

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIA CLARA DE SOUZA AMARANTE

GESTÃO INTEGRADA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS EM INDÚSTRIAS:
BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DA INDÚSTRIA 4.0

Curitiba

2024

MARIA CLARA DE SOUZA AMARANTE

GESTÃO INTEGRADA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS EM INDÚSTRIAS:
BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DA INDÚSTRIA 4.0

Artigo apresentado ao curso de MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, Setor de Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Naturais Renováveis.

Prof. Orientador: Prof. Dr. Dhyogo Miléo Taher

Curitiba

2024

RESUMO

Este artigo explora a gestão integrada de energias renováveis nas indústrias, com foco nos benefícios econômicos e ambientais da digitalização energética aliada à Indústria 4.0. A adoção de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e big data permite o monitoramento em tempo real, a automação de processos e a análise de dados, otimizando a geração e o consumo de energia. Esses avanços aumentam a eficiência energética e reduzem custos operacionais, ao mesmo tempo em que contribuem para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa, promovendo maior sustentabilidade ambiental. No entanto, o Brasil ainda enfrenta desafios significativos para a adoção plena dessas tecnologias, principalmente devido à falta de políticas públicas específicas e de incentivos robustos que facilitem a transformação digital no setor industrial. Embora existam incentivos voltados para energias renováveis, há uma necessidade urgente de evolução nas políticas que promovam a digitalização energética e a capacitação técnica de profissionais. Este trabalho propõe diretrizes práticas para a implementação desses conceitos, sugerindo melhorias na infraestrutura tecnológica, no treinamento de equipes e na superação da resistência organizacional. Conclui-se que, para que o Brasil possa aproveitar plenamente os benefícios da Indústria 4.0 no contexto energético, é essencial um maior comprometimento das políticas públicas, visando a criação de um ambiente regulatório que favoreça a inovação e a transformação digital, garantindo competitividade e sustentabilidade para o setor industrial.

Palavras-chave: Indústria 4.0, energias renováveis, digitalização, eficiência energética.

ABSTRACT

This article explores the integrated management of renewable energies in industries, focusing on the economic and environmental benefits of energy digitalization combined with Industry 4.0. The adoption of technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence, and big data enables real-time monitoring, process automation, and data analysis, optimizing energy generation and consumption. These advancements increase energy efficiency and reduce operational costs while contributing to the reduction of greenhouse gas emissions, promoting greater environmental sustainability. However, Brazil still faces significant challenges for the full adoption of these technologies, mainly due to the lack of specific public policies and robust incentives to facilitate digital transformation in the industrial sector. Although there are incentives aimed at renewable energies, there is an urgent need for the evolution of policies that promote energy digitalization and technical training of professionals. This paper proposes practical guidelines for implementing these concepts, suggesting improvements in technological infrastructure, team training, and overcoming organizational resistance. It concludes that, for Brazil to fully leverage the benefits of Industry 4.0 in the energy context, greater public policy commitment is essential, aiming at creating a regulatory environment that fosters innovation and digital transformation, ensuring competitiveness and sustainability for the industrial sector.

Keywords: Industry 4.0, renewable energies, digitalization, energy efficiency.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	7
2.1. OBJETIVO GERAL.....	7
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
3. DESENVOLVIMENTO	7
3.1. O CONTEXTO ATUAL DAS INDÚSTRIAS E A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	7
3.1.1. A Indústria 4.0 e a Transformação Digital	8
3.2. DESAFIOS E OPORTUNIDADES NA IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 NO ÂMBITO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS	11
3.2.1. O papel das políticas públicas e incentivos	12
3.3. TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 APLICÁVEIS EM SISTEMAS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	13
3.4. BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS	14
3.5. TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 EM OPERAÇÕES REAIS	15
4. DIRETRIZES PRÁTICAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DOS CONCEITOS DA INDÚSTRIA 4.0	17
5. CONCLUSÃO	20
REFERÊNCIAS	22

1. INTRODUÇÃO

A busca por uma matriz energética mais sustentável e eficiente tornou-se uma prioridade global, especialmente diante das crescentes preocupações com as mudanças climáticas e a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, as indústrias, como grandes consumidoras de energia, desempenham um papel fundamental na transição energética. A adoção de energias renováveis, integrada à digitalização dos sistemas energéticos, surge como uma solução promissora para enfrentar os desafios de eficiência energética e sustentabilidade ambiental no setor industrial.

A digitalização energética consiste na aplicação de tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas (IoT)¹, inteligência artificial e *big data*², para modernizar e otimizar a infraestrutura elétrica. Ela possibilita uma gestão mais eficaz e inteligente dos recursos, permitindo monitoramento em tempo real, automação de processos e otimização do uso de energia. Dentre os benefícios gerados pela utilização dessas tecnologias, na gestão de energias renováveis, pode-se citar a redução de custos operacionais, melhoria da eficiência energética e minimização dos impactos ambientais (Tavares, 2023). No entanto, apesar de seu potencial, a implementação dessas tecnologias enfrenta desafios, como altos custos iniciais, complexidade de integração, a necessidade de expertise técnica especializada e resistência à mudança por parte da mão de obra (Barbosa *et al.*, 2020).

Este estudo justifica-se pela necessidade de evidências concretas que comprovem os benefícios econômicos e ambientais da digitalização energética em indústrias que adotam fontes renováveis. A pesquisa visa preencher essa lacuna, oferecendo uma análise detalhada das vantagens e dos desafios da digitalização na gestão integrada de energias renováveis.

¹ IoT - *Internet of Things* - Internet das Coisas: refere-se à rede coletiva de dispositivos conectados e à tecnologia que facilita a comunicação entre os dispositivos e a nuvem, bem como entre os próprios dispositivos.

² *Big Data*: é um conjunto de dados que possuem uma alta variedade e chegam em volumes crescentes e com mais velocidade. Pode se referir também ao conjunto de técnicas capazes de se analisar grandes quantidades de dados para a geração de resultados importantes que, em volumes menores, dificilmente seria possível.

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GERAL

Analisar os benefícios econômicos e ambientais da aplicação de conceitos da Indústria 4.0 nos sistemas energéticos em indústrias que utilizam energias renováveis.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar as tecnologias da Indústria 4.0 aplicáveis;
- Identificar os benefícios econômicos sem necessariamente quantificá-los;
- Mensurar os impactos ambientais positivos;
- Elaborar diretrizes práticas para a implementação da digitalização;
- Contribuir para o desenvolvimento de políticas públicas e futuras pesquisas na área.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1.O CONTEXTO ATUAL DAS INDÚSTRIAS E A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A evolução da indústria global é marcada pela Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, caracterizada pela adoção massiva de tecnologias digitais (Tavares, 2023). Desde a década de 1980, Gontemberg (1988) já apontava que, no Brasil, as indústrias se destacavam como as maiores consumidoras de energia, responsáveis por cerca de 40% do total produzido no país.

Dados recentes do Anuário Estatístico de Energia Elétrica, divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), confirmam que essa realidade permanece até os dias atuais (EPE, 2024), como demonstrado na Tabela 1, que

apresenta o consumo dos últimos cinco anos. Essas estatísticas evidenciam a urgente necessidade de otimizar o consumo energético no setor industrial, visando aumentar a eficiência e, ao mesmo tempo, reduzir seu impacto ambiental.

TABELA 1 - CONSUMO (GWH) DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, POR CLASSE CONSUMIDORA, DE 2019 A 2023

Classe	2019	2020	2021	2022	2023
Comercial	92.083	82.524	87.788	92.495	97.913
Consumo próprio	3.258	3.138	3.373	3.269	3.285
Iluminação Pública	15.825	15.463	15.389	14.358	13.687
Industrial	167.779	166.538	182.205	184.507	188.476
Poder Público	15.702	12.764	13.232	15.145	16.425
Residencial	142.411	148.173	151.349	152.771	164.735
Rural	29.563	31.691	32.429	30.201	30.431
Serviço Público	15.964	16.345	16.879	16.695	16.921

FONTE: Adaptada de EPE (2024).

Nesse cenário, a Indústria 4.0, com o uso de tecnologias como IoT, inteligência artificial e automação avançada, possibilita a otimização dos processos produtivos, permitindo maior controle sobre o consumo energético e a eficiência na utilização de recursos. Essas inovações não apenas aumentam a competitividade das empresas, mas também são essenciais para a transição energética rumo a um modelo industrial mais sustentável e inteligente.

3.1.1. A Indústria 4.0 e a Transformação Digital

Um dos principais pilares da Indústria 4.0 é a digitalização completa das operações industriais, o que implica a capacidade de coletar, processar e utilizar dados em tempo real para melhorar a tomada de decisão e otimizar o desempenho das fábricas. Com sensores integrados aos equipamentos, as indústrias podem monitorar suas máquinas continuamente, prever falhas, ajustar a produção automaticamente e reduzir desperdícios, aumentando tanto a produtividade quanto a eficiência energética (Kander *et al*, 2013).

A escolha das ferramentas tecnológicas adequadas é crucial para o sucesso da transformação digital nas indústrias. Profissionais especializados em

análise de dados são responsáveis por avaliar e selecionar as ferramentas que melhor atendam às necessidades específicas e problemas enfrentados pelas indústrias (Martins, 2023). A *Acatech Cooperation*, academia alemã de tecnologia, elaborou em 2017, e revisou em 2020, um Índice de Maturidade da Indústria 4.0, conceito que organiza a implantação das tecnologias na cadeia produtiva, sendo usada como uma ferramenta que oferece orientação prática sobre como alcançar uma transformação digital estruturada e integrada nas empresas (Schuh *et al.*, 2020).

A Figura 1 ilustra os seis pilares da Indústria 4.0, que se inicia pela Digitalização, que estabelece a base para a automação por meio da execução eficiente de tarefas repetitivas, como o controle automatizado de sistemas de energia solar, permitindo o registro de informação de maneira constante da geração e distribuição de energia. O segundo pilar é o da Conectividade, onde os sistemas são integrados, como o uso de *smart grids* em energia eólica, que conectam turbinas ao sistema elétrico, mas ainda carecem de integração total com sistemas de gerenciamento de demanda. Esses dois primeiros pilares ainda fazem parte da indústria 3.0, mas são essenciais como estruturação da maturidade da indústria 4.0 (Dutra; Marques, 2014).



Fonte: Coutinho (2023), adaptado de Acatech (2020).

O terceiro índice de maturidade é a Visibilidade, obtida por meio de sensores e coleta de dados, permitindo a tomada de decisões com base em

informações em tempo real. Um exemplo aplicado ao contexto de energias renováveis seria o de gestão de usinas solares e eólicas, em que sensores monitoram a eficiência de cada painel ou turbina, permitindo a detecção de falhas ou oscilações na geração de energia.

O pilar seguinte é a Transparência, que vai além da visibilidade ao interpretar o grande volume de dados coletados de forma automática e transformá-los em informações acionáveis. No contexto de energias renováveis, isso pode ser exemplificado por softwares de análise que identificam padrões de desempenho de parques solares ou eólicos, permitindo por exemplo detectar a degradação de painéis solares.

Após gerar dados em sistemas conectados permitindo visibilidade e interpretação, a Capacidade Preditiva se apresenta como um pilar que permite antecipar cenários e automatizar respostas a possíveis interrupções. No setor de energias renováveis, essa capacidade seria muito proveitosa, por exemplo, para prever variações de vento em parques eólicos (De Paula, 2020).

O sexto e último pilar, a Adaptabilidade, é a capacidade de ajustar as operações automaticamente com sistemas pré-configurados (Coutinho, 2023). No contexto de usinas de energia renovável, isso significa que as operações podem ser continuamente otimizadas conforme as condições ambientais mudam, através, por exemplo, de sistemas de inteligência artificial poderiam ajustar automaticamente a operação de turbinas, prevendo oscilações e adequando a produção à demanda esperada, evitando desperdício de energia ou interrupções.

A transformação digital, neste contexto, refere-se ao processo de adoção e integração dessas tecnologias nos processos produtivos. Não se trata apenas de digitalizar operações isoladas, mas de transformar toda a estrutura organizacional e os modelos de negócio, criando novas formas de gerar valor. A implementação dessas inovações requer uma reconfiguração da infraestrutura industrial e a capacitação de mão de obra para operar e gerenciar as novas tecnologias (Branisso, 2023).

3.2. DESAFIOS E OPORTUNIDADES NA IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 NO ÂMBITO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

A Indústria 4.0 tem sido fundamental na condução da transição energética, que se refere à mudança do uso de fontes de energia fósseis para fontes de energia renováveis. Essa revolução tecnológica engloba a digitalização completa das operações industriais, permitindo a integração e a otimização de processos por meio de tecnologias avançadas. Essas tecnologias são essenciais para a implementação eficiente de energias renováveis nos sistemas industriais, pois possibilitam o monitoramento em tempo real, a previsão de falhas, e a automatização de ajustes nos sistemas de produção de energia (Kiehne; Oлару, 2017).

A transição energética dentro das indústrias enfrenta desafios significativos, apesar dos avanços tecnológicos proporcionados pela Quarta Revolução Industrial. Um dos principais obstáculos é a complexidade de integrar energias renováveis em sistemas industriais já existentes, já que muitas vezes a tecnologia implementada pode não ser compatível com as novas tecnologias. Essa problemática pode gerar altos custos iniciais de instalação, um dos grandes entraves encontrados na hora de implementar os projetos. Além disso, a resistência à mudança organizacional também se destaca, principalmente entre os trabalhadores e gestores que não estão familiarizados com as novas tecnologias (ABDI, 2023).

Adicionalmente, a falta de mão de obra qualificada em áreas como análise de dados, automação e programação é um dos maiores entraves ao desenvolvimento pleno da Indústria 4.0 no Brasil (SEBRAE, 2021).

Por outro lado, os benefícios da transformação digital são notáveis quando se trata de facilitar a transição das indústrias para a utilização de energias renováveis, seja por meio de geração própria ou compra do mercado livre de energia. A automação e a digitalização não apenas aumentam a eficiência do consumo energético dentro das indústrias, mas podem também no caso de autoprodução, otimizar a geração conforme as condições ambientais

mudam. As indústrias que integram energias renováveis podem obter economias significativas a longo prazo, além de reduzir sua pegada de carbono e melhorar sua imagem pública.

A digitalização também facilita a integração entre vários tipos de fontes de geração de energia, permitindo o controle dinâmico da geração e do consumo de energia em tempo real entre diversas fontes de uma mesma usina. Além disso, o uso intensivo de dados pode promover práticas de manutenção preditiva e otimização energética, impactando positivamente a sustentabilidade e a competitividade das empresas (Barbosa *et al.*, 2020).

3.2.1. O papel das políticas públicas e incentivos

As políticas públicas e os incentivos governamentais desempenham um papel crucial na facilitação da transição energética nas indústrias. Governos em todo o mundo têm implementado uma série de políticas para apoiar a adoção de energias renováveis e tecnologias digitais, incluindo subsídios, incentivos fiscais e programas de financiamento para pequenas e médias empresas (Costa; Araújo, 2021). Um ótimo exemplo é o programa *Green New Deal*, nos Estados Unidos, que propõe amplas reformas no setor energético, com foco em digitalização e automação para maximizar a eficiência. (Schuelke-Leech, 2021). A China, por sua vez, criou o *13th Five-Year Plan* que promove o desenvolvimento de *smart grids* e incentiva fortemente a automação de processos energéticos nas indústrias, além de apoiar a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 para reduzir o consumo de energia e emissões de carbono (Zou, 2012).

No Brasil, apesar de iniciativas com a crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis e o potencial abundante para a geração de energia eólica e solar, as políticas de incentivo à digitalização e à transição energética ainda são limitadas. As poucas iniciativas aplicadas se concentram nas políticas voltadas para a digitalização e a descentralização da produção de energia e em pequenos subsídios para projetos de energia renovável, como o programa Proinfa (Altoé, 2017). No atual cenário, para que o Brasil acompanhe a evolução global, é necessário ampliar significativamente o apoio governamental à adoção

de tecnologias digitais e renováveis, incluindo incentivos fiscais específicos, subsídios mais amplos e programas de financiamento que facilitem a integração de indústrias no caminho da digitalização e da eficiência energética. Essas iniciativas são essenciais para reduzir as barreiras à entrada e acelerar a transição para uma matriz energética mais limpa e eficiente no setor industrial.

3.3. TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 APLICÁVEIS EM SISTEMAS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

A Indústria 4.0 representa uma revolução no modo como as indústrias operam, trazendo consigo um conjunto de tecnologias avançadas que estão moldando o futuro. A aplicação dessas tecnologias em energias renováveis não apenas melhora a eficiência e a sustentabilidade, mas também permite a criação de sistemas energéticos mais inteligentes e integrados (Kagermann; Wahlster, 2022). Neste contexto, é crucial entender quais são as principais tecnologias que podem contribuir para a implementação da digitalização nos sistemas energéticos industriais. Entre elas, destacam-se:

- **Internet das Coisas (IoT):** Conectando dispositivos e sensores às redes, a IoT permite o monitoramento e controle remoto de equipamentos energéticos. Isso não só permite a melhoria da eficiência ao possibilitar ajustes em tempo real, mas também reduz desperdícios ao detectar e corrigir anomalias rapidamente. Um bom exemplo de aplicação no âmbito das energias renováveis é o uso de sensores IoT em parques eólicos para monitorar a performance das turbinas e otimizar a produção de energia (IBM, 2024). No setor solar, sistemas IoT podem monitorar painéis solares para garantir que estejam operando em sua capacidade máxima, identificando sombras ou defeitos por exemplo (De Paiva, 2021);
- **Big Data:** O processamento de grandes volumes de dados em tempo real é essencial para que as indústrias compreendam melhor seus padrões de consumo energético. Com o *Big Data*, é possível coletar e analisar dados de múltiplas fontes, proporcionando uma visão abrangente e detalhada do uso de energia. Um exemplo é o uso da tecnologia para otimizar e

distribuir energia em redes elétricas (Neoenergia, 2024), a base de utilização para o *smart grids*. Em projetos de energia solar, *Big Data* pode analisar dados de irradiância solar, temperatura e outras variáveis para maximizar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos;

- **Inteligência Artificial (IA):** Aplicada na análise de grandes volumes de dados, a IA pode identificar padrões de consumo energético que não seriam visíveis facilmente. Utilizando algoritmos avançados, a IA sugere otimizações em tempo real que podem resultar em significativas economias de energia. Um exemplo é o uso de IA para prever a demanda de energia solar com base em dados meteorológicos e históricos (Atlas Renewable Energy, 2024). Em usinas hidrelétricas, a IA pode otimizar a liberação de água para geração de energia, equilibrando a produção com a conservação de recursos hídricos por exemplo;
- **Automação de processos:** A automação, juntamente com a digitalização, garante que os sistemas energéticos operem com a menor interferência humana possível. Isso reduz significativamente os erros humanos e aumenta a confiabilidade dos sistemas (Herweck, 2024). Um exemplo é o uso de sistemas automatizados para controlar a operação de usinas hidrelétricas (Iberdrola, 2024). Em usinas eólicas, a automação pode, por exemplo, ajustar automaticamente a direção e o ângulo das lâminas das turbinas para otimizar a captação de vento.

Essas tecnologias são aplicáveis na gestão de energias renováveis, mas também desempenham um papel crucial na otimização do consumo de energia em processos industriais. Elas contribuem para uma produção mais sustentável e econômica, ajudando as indústrias a reduzir sua pegada ambiental, além de melhorar sua competitividade no mercado global.

3.4. BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

A aplicação dos conceitos e tecnologias da indústria 4.0 aos sistemas energéticos e a adoção de energias renováveis nas indústrias trazem benefícios

significativos, tanto no aspecto econômico quanto no ambiental. Economicamente, as indústrias podem reduzir custos operacionais ao otimizar o uso de energia e minimizar o desperdício. As tecnologias da indústria 4.0 permitem a identificação de ineficiências e o ajuste automático da produção para economizar energia, resultando em economias a longo prazo (Tavares, 2023).

No aspecto ambiental, o uso de energias renováveis, integrado aos pilares de maturidade da indústria 4.0, ajuda a reduzir a emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para o combate às mudanças climáticas. A digitalização potencializa esses benefícios ao utilizar sensores IoT para monitorar em tempo real a performance dos sistemas renováveis, como painéis solares e turbinas eólicas, permitindo ajustes automáticos que otimizam a produção de energia (Moraes *et al.*, 2019). Além disso, algoritmos de IA, analisam vastas quantidades de dados para prever padrões de consumo e produção, ajustando automaticamente os sistemas para garantir uma produção mais limpa e sustentável, diminuindo a pegada ecológica das operações industriais (Tavares, 2023). A análise de dados por Big Data, por exemplo, pode otimizar processos industriais, reduzindo a dependência de fontes de energia não-renováveis.

Em suma, a aplicação dos conceitos da Indústria 4.0 promove tanto a eficiência energética quanto a sustentabilidade ambiental, permitindo que as indústrias aumentem sua competitividade enquanto minimizam seus impactos no meio ambiente.

3.5. TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 EM OPERAÇÕES REAIS

Conforme apresentado, a aplicação de ferramentas da Indústria 4.0 podem impulsionar o setor energético, especialmente no que tange à redução de emissões e à otimização de recursos. Um exemplo prático é a empresa Gradska Toplana, na Croácia, que utiliza o sistema EcoStruxure™ *District Energy da Schneider Electric*, com IA para prever demandas de aquecimento. Esse sistema é um "*digital twin*"³ que ajuda a projetar, operar e otimizar a rede

³ *Digital Twin* – Gêmeo Digital: é uma representação virtual de um objeto, sistema ou processo físico que permite simular, prever e otimizar o seu desempenho.

de fornecimento de energia, reduzindo custos operacionais e minimizando perdas de calor (Schneider Electric, 2023). Isso demonstra o potencial da IA para minimizar o impacto ambiental (Herweck, 2024). Um exemplo prático é o uso desse sistema em uma hipotética usina de energia solar e biomassa para a previsão da demanda de energia, de forma precisa, ajustando a operação com base na previsão de geração solar e na disponibilidade de biomassa.

Outro exemplo relevante é o uso do software *EcoStruxure™ Microgrid Advisor* no centro comercial *Citycon*, na Finlândia. Este software permite gerenciar de forma eficiente o fornecimento e a demanda de energia, integrando diferentes fontes e sistemas, como estações de carregamento de veículos elétricos, sistemas de iluminação e HVAC⁴. Gerando um ambiente de consumo energético próximo à neutralidade de carbono (Schneider Electric, 2023), podendo, por exemplo, equilibrar a oferta de energia renovável com a demanda, mesmo em situações de intermitência das fontes solar e eólica.

Por fim, empresas como a Acciona, na Espanha, têm aumentado a eficiência operacional de parques eólicos em até 20% por meio da integração de plataformas de IA, como a PI (*Process Information*), da AVEVA. A PI System é uma plataforma de gerenciamento de dados que coleta, armazena, enriquece e visualiza dados de operações em tempo real, com total conformidade com a TI (AVEVA, 2024). Além de otimizar processos, essas soluções têm permitido prever e evitar falhas, reduzindo o tempo de inatividade e melhorando a sustentabilidade energética (Herweck, 2024).

Para o setor de energia, essa plataforma é crucial porque permite gerenciar dados provenientes de várias fontes, como parques eólicos, usinas solares, plantas de biomassa, gerando insights sobre a produção, o consumo e a eficiência operacional. Um exemplo prático é o Parque Eólico El Cortijo, no México, operado pela Acciona. Este parque tem capacidade de 183 MW e é composto por 61 turbinas eólicas de 3 MW cada, capazes de gerar energia suficiente para abastecer aproximadamente 350 mil residências. A Acciona utiliza sistemas avançados de monitoramento e controle em tempo real, com

⁴ HVAC - *Heating, Ventilation, and Air Conditioning*: Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado. Refere-se às funções básicas e primordiais dos sistemas de climatização.

suporte de IA para otimizar a produção e minimizar a necessidade de manutenção. Estima-se que este parque evite a emissão de cerca de 429 mil toneladas de CO₂ por ano, destacando-se como uma solução de grande impacto para a redução de emissões e a descarbonização no México (Acciona, 2018).

Um exemplo adicional é o Parque Eólico El Cortijo, no México, operado pela Acciona. Este parque tem capacidade de 183 MW e é composto por 61 turbinas eólicas de 3 MW cada, capazes de gerar energia suficiente para abastecer aproximadamente 350 mil lares mexicanos. A Acciona utiliza sistemas avançados de monitoramento e controle em tempo real, com suporte de IA para otimizar a produção e minimizar a necessidade de manutenção. Estima-se que este parque evite a emissão de cerca de 429 mil toneladas de CO₂ por ano, destacando-se como uma solução de grande impacto para a redução de emissões e a descarbonização no México (Acciona, 2023).

Esses exemplos ilustram como a digitalização, a conectividade, a visibilidade, a transparência, a capacidade preditiva e a de se adaptar estão transformando o setor, otimizando recursos e promovendo uma transição mais rápida para sistemas de energia sustentáveis.

4. DIRETRIZES PRÁTICAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DOS CONCEITOS DA INDÚSTRIA 4.0

A implementação das tecnologias da Indústria 4.0 em sistemas energéticos industriais pode ser desafiadora, mas traz uma série de benefícios econômicos e ambientais (Barbosa *et al.*, 2020). As diretrizes práticas descritas a seguir visam facilitar a adoção dessas tecnologias, permitindo que as indústrias otimizem o uso de energias renováveis e integrem de forma eficiente as inovações da Quarta Revolução Industrial.

O primeiro passo para a implementação dos conceitos da Indústria 4.0 em uma indústria que utiliza energias renováveis é realizar uma análise detalhada dos processos energéticos existentes. Isso inclui:

- **Mapear o consumo de energia:** identificando as principais áreas de consumo energético na indústria, com o uso de sensores IoT (Schuh et al., 2020), por exemplo, para monitorar a eficiência dos equipamentos e determinar onde há maior desperdício de energia;
- **Definir metas de sustentabilidade e eficiência energética:** as metas devem ser mensuráveis e realistas, de preferência seguindo o conceito SMART⁵, considerando tanto a redução de emissões de CO₂ quanto a economia de custos operacionais;
- **Selecionar tecnologias adequadas:** identificando as tecnologias da Indústria 4.0 que melhor se aplicam ao setor específico (Martins, 2023), como inteligência artificial para predição de demandas energéticas ou automação de processos industriais.

A implementação de tecnologias da Indústria 4.0 requer uma infraestrutura robusta que suporte, principalmente, a conectividade e o processamento de dados em tempo real. Algumas práticas recomendadas incluem:

- **Instalação de sensores IoT e plataformas de *big data*:** a utilização de sensores para monitorar a geração e o consumo de energia permite otimizar o desempenho das fontes renováveis, como painéis solares e turbinas eólicas (Barbosa *et al.*, 2020);
- **Integração com sistemas de gestão de energia (SGE):** implementação de sistemas que permitam monitorar, controlar e prever padrões energéticos com maior precisão, seja um software existente ou moldado internamente para a necessidade do sistema de geração e consumo de energia (Moraes *et al.*, 2019);
- **Conectividade e automação:** assegurar que todos os sistemas estejam conectados em uma rede unificada, utilizando automação

⁵ SMART (*Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Time-bound*) - é um método de definição de metas, as quais se baseiam em 5 fatores: S (específica), M (mensurável), A (atingível), R (relevante) e T (temporal).

para ajustar automaticamente a produção de energia de acordo com a demanda.

A implementação de novas tecnologias exige que a equipe esteja capacitada para operá-las e integrá-las ao cotidiano da indústria (Schuh *et al.*, 2020). As ações recomendadas incluem:

- **Treinamentos sobre automação e IA:** os operadores do sistema devem ser treinados no uso de tecnologias de automação e inteligência artificial, que os auxiliem para o gerenciamento e otimização do consumo energético (Martins, 2023);
- **Cultura de inovação:** a promoção de uma cultura organizacional que favoreça a inovação, incentivando a equipe a adotar novas tecnologias e processos digitais sem resistência.

Um dos grandes benefícios da digitalização e da análise de dados possibilita, é a capacidade de realizar manutenção preditiva em equipamentos, o que aumenta sua vida útil e reduz o tempo de inatividade. Para implementar essa prática, recomenda-se:

- **Análise de dados em tempo real:** sensores IoT devem ser utilizados para a coleta constante de dados das principais variáveis de cada processo, gerando um banco de dados que será utilizado para futuras análises;
- **Uso de algoritmos de IA para manutenção preditiva:** utilização de inteligência artificial para prever falhas em equipamentos e otimizar os intervalos de manutenção, baseando-se na análise de dados de desempenho em tempo real (Coutinho, 2023).

Por fim, é importante destacar que a implementação da Indústria 4.0 não se limita apenas à adoção de novas ferramentas tecnológicas. Trata-se de uma transformação completa na forma como a indústria gerencia seus recursos, opera seus sistemas e interage com o ambiente. A digitalização e a automação oferecem uma nova perspectiva para a sustentabilidade energética, permitindo que as indústrias não apenas reduzam seus custos e aumentem sua eficiência,

mas também contribuam significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e o combate às mudanças climáticas (Tavares, 2023). Com a aplicação dessas diretrizes, as indústrias estarão preparadas para enfrentar os desafios energéticos do futuro, integrando inovações tecnológicas e práticas sustentáveis em seus processos.

5. CONCLUSÃO

A integração de energias renováveis e a aplicação dos conceitos da Indústria 4.0 nas indústrias são fundamentais para enfrentar os desafios atuais de eficiência energética e sustentabilidade. A digitalização, ao permitir o monitoramento em tempo real, a automação de processos e a análise de grandes volumes de dados, oferece um caminho eficaz para otimizar a geração e o consumo de energia. Esse avanço tecnológico, especialmente quando aplicado à gestão de fontes renováveis, permite que as indústrias ajustem suas operações de forma dinâmica, aumentando a eficiência e reduzindo os impactos ambientais.

Entretanto, no Brasil, a implementação dessas tecnologias ainda enfrenta desafios significativos, especialmente no que se refere ao desenvolvimento e à aplicação de políticas públicas adequadas. Embora existam incentivos e subsídios voltados para a promoção de energias renováveis, ainda há uma lacuna em relação ao apoio governamental específico para a integração plena da Indústria 4.0 com o setor energético. É necessário que as políticas públicas evoluam para fornecer um suporte mais robusto, tanto em termos de financiamento quanto na criação de um ambiente regulatório que favoreça a adoção de tecnologias avançadas. Isso inclui não apenas incentivos financeiros, mas também programas de capacitação, infraestrutura e desenvolvimento de tecnologias nacionais que possam competir globalmente.

A capacitação das equipes e a criação de uma cultura de inovação dentro das empresas são também aspectos cruciais. O desenvolvimento de competências em automação, análise de dados e inteligência artificial deve ser uma prioridade, e as políticas públicas podem desempenhar um papel central ao

fomentar programas de educação e formação técnica. Além disso, a superação da resistência às mudanças tecnológicas, tanto por parte dos trabalhadores quanto dos gestores, é um desafio que deve ser abordado com compromisso e seriedade pelas empresas que desejam ter a inovação como um dos seus pilares.

As indústrias brasileiras que investem em digitalização e energias renováveis não apenas reduzem seus custos operacionais e aumentam sua competitividade, mas também contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se aos compromissos globais de combate às mudanças climáticas. No entanto, sem uma evolução nas políticas públicas que priorize e incentive essa transformação, o Brasil pode perder oportunidades valiosas de liderar a transição energética e digital no setor industrial. Assim, este estudo reforça a urgência de um maior comprometimento governamental e empresarial na adoção dessas práticas, visando a construção de um futuro industrial mais eficiente, competitivo e sustentável.

REFERÊNCIAS

ACCIONA. ACCIONA pone en marcha el primer parque eólico de la Reforma Energética en México. 2018. Disponível em: <https://www.acciona.com/es/actualidad/noticias/acciona-pone-marcha-primer-parque-eolico-reforma-energetica-mexico/>. Acesso em: 27 de out. de 2024.

ALTOÉ, Leandra *et al.* Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. Estudos Avançados, 2017.

ATLAS RENEWABLE ENERGY. Como as tecnologias inovadoras conduzem o futuro das energias renováveis. 2024. Disponível em: <https://pt.atlasrenewableenergy.com/como-as-tecnologias-inovadoras-conduzem-o-futuro-das-energias-renovaveis/>. Acesso em: 9 out. 2024.

AVEVA. AVEVA PI System. AVEVA, 2024.

BARBOSA, L. P.; CANAZARO, J. V.; BARBOSA, V. O. Automação industrial nacional: perspectivas e desafios do futuro. Revista Interdisciplinar Pensamento Científico, 2020.

BRANISSO, Diana Sinclair P. Transformação Digital. Rio de Janeiro: FGV, 2023.

BRASIL Ministério de Minas e Energia do Brasil. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024 – ano base 2023. Brasília, DF: EPE, 2024.

COSTA, H. L. M.; ARAÚJO, S. C. S. Transição Energética no Brasil e as Ações da ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2021.

COUTINHO, Leandro. Os 6 estágios da indústria 3.0 até 4.0 (onde a sua empresa está hoje?) 2023. Disponível em: <https://blog.img.com.br/arccgis/tecnologia/os-6-estagios-da-industria-3-0-ate-4-0-onde-a-sua-empresa-esta-hoje/>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

DE PAIVA, Rafael Negreiros. Eficiência energética em um campus universitário: considerações sobre gestão de facilidades. 2021. Tese de Doutorado.

DE PAULA, Matheus; COLNAGO, Marilaine; CASACA, Wallace. Redes neurais MLP e NARX aplicadas na previsão da velocidade do vento em parques eólicos

do estado da Bahia. Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, v. 7, n. 1, 2020.

DUTRA, Alexandre da Silva; MARQUES, Fabiana Vidal Monteiro da Silva. O uso de energias renováveis como mecanismo de sustentabilidade. Espírito Santo, set. 2014.

EMPRESA, DE PESQUISA ENERGÉTICA. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024 – ano base 2023. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2024.

GOLDEMBERG, José. Energia e desenvolvimento. Estudos avançados, 1998.

HERWECK, Peter. 2024. Digitalização e IA industrial: impulsionar a transição energética. Disponível em: <https://blog.se.com/br/sustentabilidade/2024/05/28/digitalizacao-e-ia-industrial-impulsionar-a-transicao-energetica/>. Acesso em: 15 set. 2024

IBERDROLA. A importância da digitalização em energias renováveis. 2024. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/inovacao/transformacao-digital/digitalizacao-fundamental-futuro-sistemas-energeticos?formCode=MG0AV3>. Acesso em: 9 out. 2024.

IBM. Energia renovável em ação: exemplos e casos de utilização para alimentar o futuro. 2024. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/renewable-energy-use-cases?formCode=MG0AV3>. Acesso em? 09 out. de 2024

IRENA - Agência Internacional de Energia Renovável. Para um futuro mais sustentável, a eficiência energética se faz presente no Brasil e no Mundo. 2024.

KAGERMANN, H., & WAHLSTER, W. Ten years of Industrie 4.0. Sci, 2022.

KANDER, A.; *et al.* Power to the People: Energy in Europe over the Last Five Centuries. Princeton University Press, 2013.

KIEHNE, J., & OLARU, M. Implementing Industrie 4.0 strategies: beyond technical innovations. In Basiq International Conference: New Trends in Sustainable Business and Consumption, 2017.

Martins, L. D., Athanazio, R. C. S., Franco, G. P., Paes, A. C. D. S., & Bagno, R. B. Sistema da Gestão da Inovação e Transformação Digital: em busca de uma abordagem integrada. *Revista Brasileira de Inovação*, 2023.

MORAES, F.; SILVA, L.; SOUZA, M. Tecnologias de Gestão de Energia e Sustentabilidade Industrial. *Revista Brasileira de Energia*, 2019.

NEOENERGIA. Transformação digital no setor elétrico: do uso de tecnologias ao Open Energy. 2024. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/w/transformacao-digital-no-setor-eletrico-do-uso-de-tecnologias-ao-open-energy?formCode=MG0AV3>. Acesso em: 9 out. 2024.

SILVA, Isaac Ambrosio da; BARBALHO, Sanderson César Macêdo. Modelos de maturidade do CMM aos modelos da indústria 4.0. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE INOVAÇÃO E GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO, 12., 2019, Brasília.

SCHNEIDER ELECTRIC. EcoStruxure™ District Energy Brochure. Schneider Electric, 2023.

SCHUELKE-LEECH, Beth-Anne. Disruptive technologies for a green new deal. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2021.

SCHUH, Günther; ANDERL, Reiner; DUMITRESCU, Roman; KRÜGER, Antonio; TEN HOMPEL, Michael. Using the Industrie 4.0 Maturity Index in Industry: Current Challenges, Case Studies and Trends. Joint publications, 2020.

TAVARES, Felipe Botelho. 2023. A Transformação digital e seus impactos no Setor de Energia. Disponível em: <https://ensaioenergetico.com.br/a-transformacao-digital-e-seus-impactos-no-setor-de-energia/#:~:text=A%20digitaliza%C3%A7%C3%A3o%20traz%20uma%20s%C3%A9rie,e%20menores%20custos%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 10 set. 2024

ZOU, Gao Lu. The long-term relationships among China's energy consumption sources and adjustments to its renewable energy policy. *Energy Policy*, 2012.