



Análise de Critérios na Escolha de Tecnologias da Indústria 4.0 para a Gestão de Energia

Criteria Analysis in the Choice of Industry 4.0 Technologies for Energy Management

Breno Gabardo Pallú ¹, Nathália Jucá Monteiro ², Sergio E. Gouvea da Gosta ³

RESUMO

Nos últimos anos, a evolução das tecnologias da Indústria 4.0 tem sido notável, impulsionada pela busca por competitividade e pressões ambientais, governamentais, econômicas e sociais. Essa onda tecnológica está permeando diversas áreas, destacando-se a gestão de energia. Dentro deste contexto, ao passo que as novas tecnologias prometem transformações significativas no gerenciamento energético, sua adoção não é trivial. A seleção apropriada das tecnologias requer a consideração de critérios específicos. Esta pesquisa, com abordagem quantitativa e fundamentada em revisão literária, busca identificar os principais critérios adotados pelas organizações na seleção de tecnologias da Indústria 4.0 para gestão de energia. Durante o estudo, foi possível identificar 19 critérios essenciais para a seleção dessas tecnologias, que posteriormente foram organizados em 5 categorias distintas. O objetivo é fornecer perspectivas que auxiliem na integração efetiva destas tecnologias em estratégias energéticas.

PALAVRAS-CHAVE: Critérios de seleção; Gestão de energia; Indústria 4.0; Quantitativa; Revisão literária; Seleção de tecnologias.

ABSTRACT

In recent years, the evolution of Industry 4.0 technologies has been remarkable, driven by the pursuit of competitiveness and environmental, governmental, economic, and social pressures. This technological wave is permeating various areas, with energy management standing out. Within this context, while the recent technologies promise significant transformations in energy management, their adoption is not straightforward. The appropriate selection of technologies requires the consideration of specific criteria. This research, with a quantitative approach and based on a literature review, seeks to identify the main criteria adopted by organizations in selecting Industry 4.0 technologies for energy management. During the study, it was possible to identify 19 essential criteria for the selection of these technologies, which were subsequently organized into 5 distinct categories. The aim is to provide insights that assist in the effective integration of these technologies into energy strategies.

KEYWORDS: Selection criteria; Energy management; Industry 4.0; Quantitative; Literary review; Technology selection.

INTRODUÇÃO

A era da Indústria 4.0 desencadeou uma revolução na paisagem industrial, promovendo uma integração sem precedentes de tecnologias emergentes e renovando as práticas tradicionais de manufatura. Em meio a este cenário dinâmico, a gestão de energia tem emergido como uma área crítica, dada sua relevância tanto para a

¹ Bolsista da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: brenopallu@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 2828979331119021.

² Docente do Curso de Engenharia de Produção. Universidade do Estado do Pará, Marabá, Pará, Brasil. E-mail: nathalia.monteiro@uepa.br. ID Lattes: 4742175027930986.

³ Docente do Departamento de Eletrotécnica (CT) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PB). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: gouvea@utfpr.edu.br. ID Lattes: 4549171741917116.



sustentabilidade ambiental quanto para a eficiência operacional (Nara et al., 2021; Mastrocinque et al., 2020).

Esta revolução digital, liderada pela Indústria 4.0, tem como um dos seus pilares a massiva geração e análise de dados, permitindo uma tomada de decisão mais transparente e otimizada em sistemas de manufatura (Li et al., 2022). Especificamente, a Internet das Coisas (IoT) emergiu como um catalisador, facilitando a captação de dados em tempo real, conectividade e viabilizando uma manufatura autenticamente "inteligente". (Asadi et al., 2022).

No entanto, a adoção e integração de tais tecnologias não são processos simples. Exigem a consideração de múltiplos critérios, incluindo, mas não limitado a aspectos técnicos, econômicos, gerenciais e sociais (Ferreira et al., 2019; Nara et al., 2021). Além disso, desafios emergem especialmente em economias em desenvolvimento, onde barreiras econômicas e prioridades competitivas podem influenciar o ritmo e a natureza da adoção (Nara et al., 2021).

O universo tecnológico da Indústria 4.0 é vasto e multifacetado, e sua aplicação na gestão de energia é uma promessa de otimização e sustentabilidade para as organizações modernas. Contudo, escolher as tecnologias certas e aplicá-las de maneira eficaz é um desafio em constante evolução, principalmente considerando o dinamismo inerente ao setor industrial atual. Assim sendo, a necessidade de compreender e estabelecer critérios sólidos para a seleção dessas tecnologias se torna primordial.

Este estudo visa identificar os critérios essenciais para a escolha de tecnologias da Indústria 4.0 relacionadas à gestão de energia. Com essa meta, surgem duas perguntas primordiais: "Quais são os critérios para tal seleção?" e "De que maneira esses critérios podem ser categorizados?". Ao abordar essas questões, pretende-se criar um conjunto estruturado de critérios para a seleção de tecnologias, facilitando sua aplicação na gestão de energia.

CAMINHO METODOLÓGICO

Este estudo adotou uma abordagem quantitativa, utilizando-se de uma revisão sistemática da literatura para investigar artigos relevantes nos bancos de dados *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*. Para otimizar a pesquisa, as palavras-chave foram categorizadas em dois eixos principais: gestão e tecnologias. No eixo de gestão, o Grupo 1 (*Energy*) abrangeu termos como "*energy management*" e "*energy efficiency*", enquanto o Grupo 2 (*Industry 4.0*) incorporou termos como "*industry 4.0*", "*industrie 4.0*", "*smart factoring*", "*smart factory*" e "*smart manufacturing*". Em relação ao eixo de tecnologias, o Grupo 1 (*Energy*) continha "*energy selection*", "*energy management*" e "*energy efficiency*"; o Grupo 2 (*Industry 4.0*) os mesmos termos do eixo de gestão; e o Grupo 3 (MCDM) englobou "*mcdm*", "*mcda*", "*multicriteria decision making*" e "*multiple criteria decision making*". Durante a pesquisa, palavras-chave dentro de cada grupo foram vinculadas com o operador "OR", utilizado para agrupar sinônimos ou termos relacionados, de modo que qualquer um dos termos poderia aparecer nos resultados. Já os diferentes grupos de palavras-chave foram conectados usando o operador "AND", assegurando que os documentos resultantes contivessem informações relevantes a todos os grupos, servindo como um filtro complementar.

A investigação focou em artigos publicados em inglês entre 2018 e 2023, abarcando tanto publicações em jornais científicos quanto apresentações em congressos.



Com a realização das pesquisas nos três bancos de dados, localizou-se 1.117 publicações inicialmente, 417 foram retidas após a eliminação de duplicatas. Uma avaliação criteriosa dos títulos, usando como base critérios de exclusão que descartavam artigos cujos, principalmente, temas ou resumos desviavam significativamente do foco da pesquisa ou eram percebidos como menos relevantes, permitiu a seleção de 52 dos 417 artigos. Desses, uma revisão minuciosa dos resumos destacou 39 como sendo de alta relevância para a investigação.

Para a coleta de dados, houve uma análise integral via leitura dos 39 artigos selecionados, tendo como principal objetivo responder à questão: "Quais os critérios para seleção de tecnologias de transformação digital?". Todos os dados pertinentes foram meticulosamente anotados e organizados manualmente em planilhas no Excel. Posteriormente, com base nas respostas compiladas, iniciou-se o processo de categorização das informações, visando responder a uma segunda indagação: "Como categorizar esses critérios?". A partir dessa análise, categorias temáticas foram delineadas para proporcionar um entendimento mais estruturado dos critérios identificados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nas revisões literárias realizadas sobre gestão de energia e indústria 4.0, foi possível identificar critérios chave para a seleção de tecnologias de transformação digital. Como resultado deste processo rigoroso, identificaram-se 19 critérios essenciais. Estes, por sua vez, foram posteriormente organizados em 5 categorias distintas, proporcionando uma compreensão aprofundada e estruturada dos critérios fundamentais para a seleção de tecnologias de transformação digital no contexto da gestão de energia e indústria 4.0.

Tabela 1 – Classificação dos critérios

| Categorias Critérios | Organizacional | Técnico | Econômico | Praticidade | Qualidade |
|--|----------------|---------|-----------|-------------|-----------|
| Custos | | | X | | |
| Escalabilidade | | | X | | |
| Confiabilidade | | X | X | | X |
| Facilidade de uso | | | | X | |
| Interação ou integração com outras tecnologias | | | X | X | |
| Suporte técnico | | X | | X | |



| | | | |
|--|---|---|---|
| Flexibilidade | X | X | |
| Ruído em sensores | | | X |
| Benefícios sociais | | | X |
| Eficiência em tempo ou uso de recursos | | X | X |
| Incentivo financeiro | X | X | |
| Ciclo de vida | | X | X |
| Tempo de resposta do sensor | | | X |
| Ética | X | | |
| Sistema de controle integrado | X | | |
| Implementação | | X | X |
| Eficiência computacional | X | | |
| Otimização da utilização de energia | X | X | |
| Protocolos de comunicação | X | | X |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A relação da Indústria 4.0 com a sustentabilidade, abrangendo os pilares econômico, ambiental e social, tornou-se uma preocupação central no ambiente industrial contemporâneo. Nara et al. (2021) exploram como tecnologias inovadoras, especificamente a IoT e sistemas ciber-físicos, são capazes de potencializar práticas sustentáveis, ilustrando por meio da indústria de plásticos no Brasil. Complementando essa perspectiva, Mastrocinque et al. (2020) enfocam o impacto da Indústria 4.0 nas cadeias de suprimentos, com ênfase na cadeia de suprimentos fotovoltaica. Eles apresentam ferramentas e modelos que abrangem os pilares da sustentabilidade.

Dentro deste contexto, é relevante destacar que a Indústria 4.0 é uma transformação caracterizada pela integração digital de processos industriais visando maximizar a eficiência operacional (Moktadir et al., 2019). A integração destes estudos realça a confluência entre a inovação tecnológica e a sustentabilidade.

Em meio à contínua transição observada no setor energético, a gestão de energia mostra-se crucial. Diante de um mercado energético diverso, tanto para consumidores residenciais quanto empresariais, o gerenciamento eficiente de energia torna-se primordial (Schaefer et al., 2021). Estes desafios reforçam a necessidade de adaptar o consumo à crescente demanda, levando à busca por modelos de gestão que incorporem tecnologias inovadoras (Schaefer et al., 2021). Neste cenário, a integração de tecnologias da Indústria 4.0, como IoT, Sensores, Computação em Nuvem e *Big Data*, estão moldando a próxima geração de sistemas de gestão de energia, sendo representados de maneira promissora pelo conceito de *Energy Cloud* (Schaefer et al., 2021).



Adotar tais sistemas e mecanismos de gestão de energia eficazes é fundamental para migrar para redes mais sustentáveis e resilientes. Políticas governamentais e programas de incentivo impulsionam essas iniciativas, mitigando impactos ambientais e promovendo eficiência econômica e operacional (Schmitt et al., 2023).

No presente estudo, identificou-se uma significativa concordância com as abordagens propostas por Ferreira et al. (2019), especialmente no que tange à organização dos critérios. Durante a análise, notou-se a necessidade de não apenas agrupar os critérios encontrados, mas também de separá-los em subcritérios, uma vez que manter os critérios apenas agrupados não proporcionava uma visão tão clara quanto sua segmentação em subcategorias. Tal qual delineado pelos referidos autores, que organizam os critérios em quatro níveis e esmiúçam o critério técnico em subcritérios, esta pesquisa também segue uma abordagem hierárquica na categorização dos critérios. Essa similitude sublinha a importância e a prevalência deste método estrutural em investigações direcionadas à otimização de processos na gestão de energia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As complexidades associadas à integração de tecnologias avançadas no setor energético requerem uma abordagem estratégica e informada. Esta perspectiva é garantida por revisões sistemáticas da literatura, como a realizada neste estudo. Embora tenha se recorrido a bancos de dados renomados e focado em publicações recentes, oferecendo uma visão atual e relevante das tendências emergentes, é imperativo reconhecer uma limitação significativa da metodologia adotada: a quantidade limitada de artigos examinados. Esta restrição, devida principalmente a restrições de tempo, pode ter introduzido potenciais vieses ou omissões na análise da fusão entre gestão de energia e técnicas da Indústria 4.0.

Métodos de tomada de decisão multicritério destacam-se como ferramentas valiosas para navegar pela vastidão de opções tecnológicas. Enquanto organizações caminham rumo a um futuro mais eficiente e sustentável, torna-se essencial adotar práticas informadas, combinando percepções da Indústria 4.0 com expertise em gestão de energia. Esta abordagem pode catalisar uma transformação industrial voltada à otimização produtiva e à sustentabilidade. Pesquisas futuras deveriam considerar uma abordagem mais ampla, incorporando, por exemplo, meta-análises, para uma compreensão mais robusta e abrangente do tema.

Agradecimentos

À Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná pelo apoio inestimável à pesquisa.

Aos professores Sergio e Nathália pela orientação.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.



REFERÊNCIAS

ASADI, Shahla et al. Effect of internet of things on manufacturing performance: A hybrid multi-criteria decision-making and neuro-fuzzy approach. **Technovation**, v. 118, p. 102426, 2022.

FERREIRA, Caio Cesar et al. Application of MCDM method for technologies selection to support energy management. **Procedia Manufacturing**, v. 39, p. 1289-1296, 2019.

LI, Chunquan; CHEN, Yaqiong; SHANG, Yuling. A review of industrial big data for decision making in intelligent manufacturing. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 29, p. 101021, 2022.

MASTROCINQUE, Ernesto et al. Industry 4.0 enabling sustainable supply chain development in the renewable energy sector: A multi-criteria intelligent approach. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 182, p. 121813, 2022.

MOKTADIR, Md Abdul et al. Key factors for energy-efficient supply chains: Implications for energy policy in emerging economies. **Energy**, v. 189, p. 116129, 2019.

NARA, Elpidio Oscar Benitez et al. Expected impact of industry 4.0 technologies on sustainable development: A study in the context of Brazil's plastic industry. **Sustainable Production and Consumption**, v. 25, p. 102-122, 2021.

SCHAEFER, Jones Luís et al. Permeability evaluation of Industry 4.0 technologies in cloud-based energy management systems environments-Energy Cloud. **Production**, v. 31, 2021.

SCHMITT, Konrad et al. A Review on Active Customers Participation in Smart Grids. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, 2022.