



Ações de sustentabilidade 4.0 em uma empresa de energia: uma proposta de modelo de decisão multicritério

Poliana Carneiro Gomes¹
Bruna Keila Macieira Santos²
Kleber Jose Tenorio Tavares³
Fagner José Coutinho De Melo⁴
Pablo Aurélio Lacerda De Almeida Pinto⁵

Resumo

Entender quais medidas precisam ser tomadas para a organização caminhar à sustentabilidade 4.0 é um trabalho complexo, mas compreender em que ordem os projetos relacionados a sustentabilidade 4.0 devem ser implementados é uma atividade ainda mais árdua. Desta maneira, o presente artigo possui como objetivo propor um modelo de decisão multicritério para elencar a ordem de prioridade das ações de sustentabilidade 4.0 numa empresa de geração e transmissão de energia utilizando o método de sobreclassificação PROMETHEE II. Foram elencados 8 projetos que impactam diretamente no alcance da sustentabilidade 4.0. Os resultados demonstraram que a aplicação do método de decisão torna mais clara a visão das alternativas para com os critérios estabelecidos e mais embasado o processo de decisão, contribuindo para a definição de prioridades. Análises de sensibilidade foram realizadas para confirmar a eficácia do modelo proposto. O estudo contribui para apoiar uma ampla rede de fornecedores de serviços como também gerar insights para técnicos e consultores que atuam em políticas internas e externas envolvendo as questões de sustentabilidade em empresas do ramo energético.

Palavras-chave: Sustentabilidade 4.0; Indústria 4.0; PROMETHEE II; Decisão Multicritério.

Sustainability 4.0 actions in an energy company: a multi-criteria decision model proposal

Abstract

Understanding what measures need to be taken for the organization to move towards sustainability 4.0 is a complex work but understanding in what order the projects related to sustainability 4.0 must be implemented is an even more harmful activity. Thus, the purpose of this article is to propose a multi-criteria decision model to list the order of priority of

¹ Mestre em Administração pela Universidade de Pernambuco; Brasil, Universidade de Pernambuco, polianacarneirogomes@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6641-6613>; <http://lattes.cnpq.br/6368995738554655>.

² Mestre em Administração pela Universidade de Pernambuco; Brasil, Universidade de Pernambuco, bruna.ksantos@upe.br, <https://orcid.org/0000-0002-3495-8474>; <http://lattes.cnpq.br/8616619681358204>.

³ Especialista em Gestão Ambiental pela Universidade de Pernambuco. Brasil, Companhia Hidroelétrica do São Francisco, klebertenorio@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0599-8917>; <http://lattes.cnpq.br/4464539007122825>.

⁴ Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Pernambuco; Brasil, Universidade de Pernambuco, Professor Adjunto, <https://orcid.org/0000-0002-0550-5177>, <http://lattes.cnpq.br/5370039475929029>.

⁵ Doutor em Economia pela Universidade Federal de Pernambuco; Brasil, Universidade de Pernambuco, Professor Associado, <https://orcid.org/0000-0001-5199-5181>; <http://lattes.cnpq.br/6921695162250491>.



sustainability 4.0 actions in an energy generation and transmission company using the PROMETHEE II overclassification method. 8 projects were listed that directly impact in the reach of sustainability 4.0. The results demonstrated that the application of the decision method makes the vision of alternatives clearer to the established criteria and the decision process is grounded, contributing to the definition of priorities. Sensitivity analyses were performed to confirm the effectiveness of the proposed model. The study contributes to support a wide network of service providers as well as generate insights for technicians and consultants who work in internal and external policies involving sustainability issues in companies in the energy industry.

Keywords: Sustainability 4.0; Industry 4.0; PROMETHEE II; Multicriteria Decision.

Recebido em: 05/03/2024

Aceito em: 05/04/2024

Publicado em: 26/04/2024

1 Introdução

A indústria 4.0 (I4.0) tem mudado a forma de trabalho e funcionamento de negócios ao redor do mundo com o desenvolvimento de tecnologias (Bai *et al.*, 2020). Ela tem foco na produção de bens utilizando tecnologia e internet com redes de computadores integrados, ampla análise e acompanhamento de dados, utilização de Big Data, realidade aumentada, Inteligência Artificial (IA), constante preocupação com a segurança dos dados, tida como novo modelo de manufatura, utiliza o ciberespaço e interlocução de sistemas inteligentes (Almada, 2015). Este foco na indústria 4.0 foi formalmente debatido em 2013, em documento desenvolvido pela Academia Nacional Alemã de Ciências e Engenharia (Gomes *et al.*, 2023).

Com iniciativas que buscam estabelecer as inovações em toda a cadeia produtiva, no Brasil ainda há dificuldades de implantação das ferramentas da I4.0 devido ao alto nível de investimentos necessários para o estabelecimento dos sistemas e equipamentos, como também poucos incentivos governamentais, o que se apresenta como fator complexo nas indústrias brasileiras (Siltori, 2020). Já países, como a Alemanha, é adotada uma abordagem que destaca a importância de uma visão estratégica e de políticas públicas eficazes para impulsionar a adoção e implementação bem-sucedida da Indústria 4.0 em toda a cadeia produtiva (Oliveira; Simões, 2017).

Enquanto o conceito de I4.0 emerge, questões de sustentabilidade ao longo dos anos também têm ganhado evidência, dado os grandes problemas ambientais ocorridos no planeta, muitos deles em decorrência da atuação das indústrias, inclusive comprometendo futuras gerações (Yin; Qin, 2019). Para Elkington (2013), a sustentabilidade deve ser entendida como uma forma de gestão que tem a intenção de lucrar envolvendo todo o desenvolvimento econômico e social, mas sem desconsiderar a proteção dos recursos naturais do planeta. Segundo o autor, os negócios precisam ser gerenciados não apenas do ponto de vista financeiro, mas sim pelos aspectos sociais e ambientais.

A sustentabilidade introduzida na Indústria 4.0 significa que as organizações terão melhores previsões e eficiência, conseguindo aplicar reduções que minimizam os impactos



ambientais. Por exemplo: uso de energia e combustíveis, como também aplicação do conceito dos 6Rs que prevê repensar, recusar, reduzir, reutilizar, reciclar, reintegrar, devido a melhor eficiência dos processos e customizações integrando produtos, processos e sistemas, levando a uma fabricação sustentável desde o desenvolvimento até o pós-venda (Barbosa, 2008; Siltori, 2020).

Diante do cenário e pensando na rápida necessidade de resposta às demandas, surgiu o conceito de Sustentabilidade 4.0 que tem ganhado força ao longo dos últimos anos e significa a união dos conceitos da Sustentabilidade com as ações da Indústria 4.0, buscando otimização de processos e resultados. Para Filgueiras e Melo (2022) a Sustentabilidade 4.0 é a integração das dimensões econômica, social e ambiental com as tecnologias da indústria 4.0. Tais iniciativas já foram adotadas por gigantes de alguns ramos, à exemplo da Nike, Natura, Microsoft, Tesla, entre outras. O meio ambiente e o mercado têm começado a demandar que as organizações evoluam para a Indústria 4.0 (Bai *et al.*, 2020). Neste sentido, espera-se que as organizações comecem a implementar as ferramentas da Indústria 4.0 visando o equilíbrio das dimensões econômica, social e ambiental.

Mas entender quais medidas precisam ser tomadas para a organização caminhar à sustentabilidade 4.0 é um trabalho complexo, ainda mais, compreender em que ordem os projetos ligados a sustentabilidade 4.0 devem ser implementados. Segundo Fofan *et al.* (2019) os gestores sentem a necessidade de apoio para estruturar um plano de ação e estabelecer uma ordem para a condução dessas ações.

Nesse contexto, uma empresa de geração e transmissão de energia brasileira elencou possíveis projetos para o alcance da Sustentabilidade 4.0 na empresa, mas não definiram qual a prioridade de implementação. A empresa de geração e transmissão de energia estudada é uma organização de grande porte que atua no setor de geração e transmissão de energia elétrica. Possui aproximadamente 3.200 funcionários, dos quais 2.000 estão diretamente ligados à produção. A organização tem pouco mais de 70 anos de criação e é altamente representativa no mercado regional. Implementou um setor focado em sustentabilidade 4.0 que tem o objetivo de enquadrar a organização nos padrões da sustentabilidade 4.0 até 2025. Para o alcance desse propósito, a área elencou 8 metas ou projeto visando a sustentabilidade 4.0, esses projetos foram transformados em alternativas visando o alcance da sustentabilidade 4.0. Para preservar o sigilo da empresa estudada, a organização passará a ser referida neste artigo pelo nome fictício de ENERGY.

Assim, este estudo possui a seguinte pergunta de pesquisa: **Qual projeto deve ser priorizado para enquadrar a organização nos padrões da sustentabilidade 4.0 até 2025?** Desta maneira, este artigo tem objetivo propor um modelo de decisão multicritério para elencar a ordem de prioridade das ações de sustentabilidade 4.0 numa empresa de geração e transmissão de energia utilizando o método de Sobreclassificação PROMETHEE II.

Dentre os principais benefícios da escolha do uso do Método PROMETHEE II destaca-se: clarifica a resolução de conflitos entre critérios, promovendo uma maior racionalidade no processo decisório (Sousa *et al.*, 2018), estabelece uma ordem completa entre alternativas (Cavalcante; Almeida, 2005), é facilmente compreensível, utilizando parâmetros e conceitos de rápida assimilação pelo decisor (Athawale; Chakraborty, 2010) e ao contrário de outros métodos, como o AHP, o PROMETHEE não requer uma nova comparação de pares quando alternativas comparativas são adicionadas ou excluídas.

O presente estudo se destaca pela sua relevância científica ao preencher uma lacuna na literatura atual, abordando a emergente intersecção entre Indústria 4.0 e sustentabilidade, especialmente no contexto da Sustentabilidade 4.0. Embora existam inúmeros estudos sobre Indústria 4.0 e sustentabilidade (e.g. Ghobakhloo, 2020; Luthra e Mangla, 2018; Bai *et al.*, 2020; Bonilla *et al.*, 2018; Gabriel e Pessl, 2016), a análise específica da Sustentabilidade 4.0



ainda é escassa, representando uma lacuna significativa no conhecimento acadêmico. Portanto, este estudo agrega valor ao campo acadêmico ao oferecer insights teóricos e práticos sobre como as organizações podem integrar efetivamente as dimensões econômica, social e ambiental com as tecnologias da Indústria 4.0, contribuindo para a expansão do conhecimento nesse domínio.

Além da relevância científica, o estudo possui implicações sociais significativas. A crescente conscientização sobre questões ambientais e a demanda por práticas sustentáveis estão pressionando as organizações a adotarem abordagens mais responsáveis. Nesse contexto, a Sustentabilidade 4.0 oferece um caminho promissor para alcançar o equilíbrio entre lucratividade e responsabilidade ambiental e social. Apesar do modelo proposto ser desenvolvido com um propósito específico, ele é passível de adaptações e replicabilidade para novos problemas. Desta maneira, ao propor um modelo de decisão multicritério para priorizar a implementação de ações de Sustentabilidade 4.0 em uma empresa de geração e transmissão de energia, este estudo não apenas auxilia a organização em questão, mas também fornece insights valiosos para outras empresas que buscam adotar práticas sustentáveis em um contexto de Indústria 4.0. Dessa forma, o estudo não apenas contribui para o avanço do conhecimento acadêmico, mas também para o desenvolvimento de soluções práticas que promovam o desenvolvimento sustentável e a inovação no setor industrial.

2 Fundamentação Teórica

Esta seção apresentará os principais conceitos que irão nortear este trabalho como Indústria 4.0 e sustentabilidade 4.0.

2.1 Indústria 4.0

A dinâmica da indústria é constantemente moldada pelas demandas em evolução da sociedade. Nesse sentido, a sociedade já passou por quatro revoluções industriais. Durante o período de 1760 a 1840, ocorreu a Primeira Revolução Industrial (Schwab, 2016). Este marco histórico foi caracterizado pela introdução de duas inovações fundamentais que revolucionaram os setores de produção e transporte da época: a descoberta do carvão como fonte de energia e o desenvolvimento das máquinas a vapor. A adoção de máquinas nas indústrias não apenas impulsionou a eficiência produtiva, mas também desencadeou uma migração maciça da população rural para as cidades em busca de oportunidades de emprego nas fábricas (Tanveer et al., 2023).

A Segunda Revolução Industrial aconteceu no final do século XIX com a expansão da linha de produção em massa (Mata et al., 2018). Essa revolução foi caracterizada basicamente pela produção de aço, o desenvolvimento de combustíveis derivados do petróleo, a implementação da linha de montagem, o aprimoramento do motor de explosão da locomotiva a vapor, os avanços na fabricação de produtos químicos e a eletricidade (Nayyar e Kumar, 2020). No século XX, teve início a terceira revolução industrial, caracterizada pela integração inovadora do setor de tecnologia da informação e suas aplicações nos processos de produção e consumo. Nesse período, destacaram-se avanços como a robótica, a exploração espacial e a biotecnologia, entre outras inovações (Gomes et al., 2023).

Nesse contexto surge a Quarta Revolução Industrial fundamentada em um conjunto de tecnologias habilitadoras, tais como inteligência artificial, robótica, manufatura aditiva, neurotecnologias, biotecnologias, realidade virtual e aumentada, novos materiais e tecnologias energéticas. Essas tecnologias constituem a base da Indústria 4.0 (I4.0), que se caracteriza por uma rápida evolução dos processos, em contraste com uma progressão linear (Schwab, 2018).



A I4.0 se destaca por ser um procedimento industrial com significativo aumento de conhecimento e valor agregado (Müller; Herzog, 2015). Entre os objetivos da Indústria 4.0, o principal é satisfazer os pré-requisitos dinâmicos de geração e melhorar a adequação e eficácia de todo o negócio através de frameworks físicos e digitais, tendo como aspectos fundamentais os seguintes conceitos: otimização e digitalização; customização da produção; adaptação e automação; interação homem-máquina (HMI); e comunicação e troca automática de dados (Posada et al., 2015, Roblek et al., 2016; Lu, 2017).

A Indústria 4.0 tem como princípios: (1) Interoperabilidade: utilização da Internet das Coisas (IoT) e Internet dos Serviços (IoS); (2) virtualização: monitoramento e fiscalização dos processos de maneira integral; (3) descentralização: autonomia e utilização de informações para a tomada de decisão; (4) capacidade em tempo real: automatização e rastreamento permanentes; (5) orientação a serviços: personalização de programas; (6) modularidade: que permite rápidas soluções (Almada-Lobo, 2015; Elkington, 1988).

2.2 Sustentabilidade 4.0

Sustentabilidade para Elkington (2013), se caracteriza por três dimensões, sendo elas a econômica, a social e a ambiental. Esse termo vem sendo bastante utilizado em âmbito global para tratar questões relacionadas aos múltiplos impactos que práticas de produção e gestão têm gerado na população e ambiente como um todo, ocasionando preocupações sobre as consequências para as gerações futuras. Num momento em que a sociedade necessita enfrentar novos desafios relacionados aos problemas de desigualdade social, desemprego e principalmente prejuízos ambientais, sendo esse último muitas vezes irreversível (Oliveira et al., 2011), repensar práticas e avaliar a história apresenta-se como alternativa para a implementação de mudanças necessárias e relevantes.

Baseado nessas reflexões e conceitos desde a década de 60, estudiosos buscam modelos que otimizem os recursos e soluções relacionadas ao desenvolvimento sustentável. Onde para o autor Elkington (2013), no modelo TBL (Triple Bottom Line), retrata que a sustentabilidade deve ser entendida como uma forma de gestão que tem a intenção de lucrar envolvendo todo o desenvolvimento econômico e social, mas sem desconsiderar a proteção dos recursos naturais do planeta. Segundo o autor, os negócios precisam ser gerenciados não apenas do ponto de vista financeiro, mas sim pelos aspectos sociais e ambientais.

Ainda há poucas organizações brasileiras preparadas para enfrentar todas as mudanças necessárias como defendido por Oliveira e Simões (2017), mas sabe-se também que as empresas deverão buscar cada vez mais a sustentabilidade empresarial, gerando valor nas dimensões econômicas, sociais e ambientais (Arena et al., 2010).

Arelado à definição de sustentabilidade, para o desenvolvimento do conceito de sustentabilidade 4.0 tem-se a atual Revolução Industrial, também chamada de Indústria 4.0. Esta alavanca ferramentas e tecnologias inovadoras em automação, causando influências em mercados industriais de todos os ramos. O que certamente impacta em um caminho sem retorno dos meios de produção e gestão nas organizações, assim como defendem Oliveira e Simões (2017). Na Indústria 4.0 as novas tecnologias oferecem maior eficiência nos recursos e na produção, levando em consideração com mais critérios as questões ambientais e sociais orientadas para a Sustentabilidade e considerando que cada tecnologia influenciará áreas diferentes em determinados ramos de produção. É através da união desses conceitos que se dá início ao conceito de Sustentabilidade 4.0.

Baseado no estudo feito e conceituações apresentadas, os autores interpretam o conceito de Sustentabilidade 4.0 como a utilização das tecnologias da Indústria 4.0 (e.g. Big Data, robôs autônomos, manufatura aditiva, realidade virtual e aumentada, IoT, IoS,



computação em nuvem) para o alcance das três dimensões da sustentabilidade, ou seja, ambiental, econômica e social na organização.

Para que o conceito de Sustentabilidade 4.0 funcione é necessária visão holística onde os pilares econômico, social e ambiental, conforme já definido acima, sejam implementados em todo o ecossistema para uma efetiva mudança de paradigma social, organizacional e cultural incorporando de maneira natural os conceitos às vivências práticas, praticada como um exercício político e de cidadania entre as pessoas e organizações, conforme pontuam Portilho (2005) e Jacobi (2003). Torna-se importante destacar ainda que a adoção dos princípios da Sustentabilidade 4.0 permitirão a existência de sistemas de gestão mais inteligentes e colaborativos, potencializando as melhorias nos debates, na legislação, processos e resultados.

Para tal, a empresa deverá elencar ações e práticas para variados âmbitos de atuação, onde de maneira simples possam ser visualizadas as etapas de implementação do serviço de Sustentabilidade 4.0 em sua integralidade. Onde repensar o uso dos recursos deverá ser uma constante preocupação e a automação deve ser visto como fator de decisão estratégico entre as múltiplas variáveis dos produtos inteligentes que podem ser disponibilizados aos clientes, sejam eles finais ou intermediários, evitando assim maiores impactos ambientais e melhor aproveitamento dos recursos.

Essa visão da Sustentabilidade 4.0 com a busca da integração das tecnologias da Indústria 4.0 com os princípios de sustentabilidade se alinha diretamente com os objetivos do ESG (Environmental, Social and Governance), no qual as empresas são incentivadas a adotar práticas de negócios que considerem não apenas o lucro financeiro, mas também os impactos sociais e ambientais de suas operações (Costa; Ferezin, 2021). Assim, a ênfase na implementação de sistemas de gestão mais inteligentes e colaborativos pode ser vista como uma parte integrante da governança corporativa sustentável (Santos et al., 2023).

Por fim, as empresas devem ter uma mentalidade voltada para Sustentabilidade 4.0. Ou seja, focadas na redução de custos e melhoria dos processos. Garantindo assim mais competitividade e resultados em um contínuo processo de transformação e reinvenção. Portanto, a abordagem de Sustentabilidade 4.0 delineada no texto não só complementa os princípios do ESG, mas também oferece um caminho prático para as empresas adotarem práticas sustentáveis em linha com esses critérios de avaliação cada vez mais importantes.

A respeito do estado da arte na temática de sustentabilidade 4.0, Filgueira et al. (2024) realizaram uma pesquisa cujo objetivo foi avaliar a percepção dos clientes em relação aos benefícios gerados pela sustentabilidade 4.0 no setor bancário. Os autores identificaram que benefícios como redução do tempo de atendimento (dimensão econômica) e uso eficiente de recursos digitais (dimensão ambiental) foram os mais bem avaliados. Ainda no estudo Filgueira et al. (2024), foi realizada uma consulta na literatura no qual foram identificados 8 artigos com a temática sustentabilidade 4.0 que serão apresentados a seguir.

Reis et al. (2021) desenvolveram uma revisão bibliométrica integrada a uma análise de contexto, com o propósito de criar um arcabouço voltado para a Sustentabilidade 4.0, direcionado a governos, organizações e instituições acadêmicas. Os achados revelaram um total de 19 sugestões para fomentar a sustentabilidade por meio da Indústria 4.0, distribuídas em 8 para o Setor Governamental, 6 para Organizações e 5 para o Âmbito Acadêmico.

Por meio de uma análise bibliométrica, Motta et al. (2022) analisaram as tendências de pesquisa associadas à "Indústria 4.0 e Sustentabilidade Empresarial". Os autores identificaram quatro principais direções: 1. Utilização da Indústria 4.0 como suporte à sustentabilidade; 2. Interação e convergência entre sustentabilidade e Indústria 4.0; 3. Incorporação dos princípios de sustentabilidade no desenvolvimento da Indústria 4.0; e 4. Implementação de práticas de gestão para uma Indústria 4.0 sustentável. Javaid et al. (2022) realizaram uma revisão da



literatura para identificar as aplicações de sustentabilidade 4.0. Os autores identificaram 17 aplicações classificadas em três clusters: o ambiental, o social e o econômico.

Eldem et al. (2022) realizaram um estudo de caso em uma empresa fabricante de automóveis na Turquia. O artigo teve por objetivo avaliar os efeitos da pandemia de COVID-19 nas operações da cadeia de suprimentos visando a sustentabilidade 4.0. Dentre os resultados encontrados, destacam-se os efeitos de escassez de matérias-primas, restrições de transporte e mão de obra, variações na demanda, aumento de licenças médicas e a implementação de novas regulamentações de saúde e segurança.

Filgueiras e Melo (2023) foram os primeiros autores a desenvolver um conceito formal da sustentabilidade 4.0. Os autores realizaram uma revisão da literatura para identificar os benefícios para sustentabilidade 4.0 a partir das ferramentas da indústria 4.0. Os autores listaram 100 benefícios alocados nas dimensões econômica, social e ambiental.

Sahoo et al. (2023) desenvolveram uma análise bibliométrica integrada a uma revisão sistemática da literatura para detectar as tendências da aprendizagem profunda nas operações de manufatura. Os resultados evidenciaram que a Aprendizagem Profunda possui uma ampla gama de aplicações em áreas como Manutenção 4.0, Qualidade 4.0, logística 4.0, Manufatura 4.0, Sustentabilidade 4.0 e Cadeia de Suprimentos 4.0.

Santos et al. (2023) propuseram uma simulação de um modelo com o intuito de identificar as relações contextuais entre as soluções sustentáveis da indústria 4.0 em escritórios de advocacia. Dentre os resultados destacam-se as soluções mais importantes como: Aumento da Segurança, a Melhoria da Qualidade, a Personalização de Serviços, a Flexibilidade na Prestação de Serviços, a Redução de Desperdício, além de Infraestrutura e Serviços Inteligentes. Por fim, Silva e Melo (2024) realizaram uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de identificar os fatores que afetam a sustentabilidade 4.0. Os autores identificaram 46 fatores divididos nas dimensões econômica, social e ambiental.

2.3 Métodos de decisão multicritério

Uma característica de grande relevância do ser humano é a capacidade de tomada de decisões, de diferentes níveis de complexidade. O processo que consiste na tomada de decisão é influenciado por diversos fatores, desde psicológicos, culturais e econômicos, até habilidades, conhecimento disponível e preferências do decisor (Almeida, 2013; Gomes; Gomes, 2012). O problema atual de tomada de decisão é caracterizado por um número crescente de alternativas e critérios conflitantes, entre os quais tomadores de decisão precisam ordenar, classificar ou mesmo descrever detalhadamente as alternativas disponíveis, levando em consideração vários critérios (Araújo e Almeida, 2009).

Por conta dessa complexidade, segundo Almeida (2013) e Vincke (1992) a metodologia de Multicritério de Apoio à Decisão visa fornecer àqueles que precisam tomar uma decisão as ferramentas necessárias e suficientes para a resolução de problemas nos quais múltiplos pontos de vista, até mesmo contraditórios, devem ser considerados. De acordo com Almeida et al. (2015), problemas complexos são caracterizados por haver, pelo menos, dois critérios de avaliação que podem ou não ser quantificáveis, que conflitam entre si e que são possíveis de medir por escalas cardinais, verbais ou ordinais. Para a resolução desses problemas complexos, a literatura contém uma riqueza de métodos multicritério com a finalidade de apoiar a tomada de decisão.

Existem os métodos de sobreclassificação ou superação, que são métodos que se baseiam na comparação par a par entre as alternativas, por exemplo os métodos ELECTRE e PROMETHEE. E métodos de agregação aditiva ou soma ponderada, que são os que levantam preferências junto ao decisor e assim estabelecem parâmetros, como os métodos SMARTS, SMARTER, MACBETH, AHP, UTA, TOPSIS e Entropia. Entre esses, os métodos da família

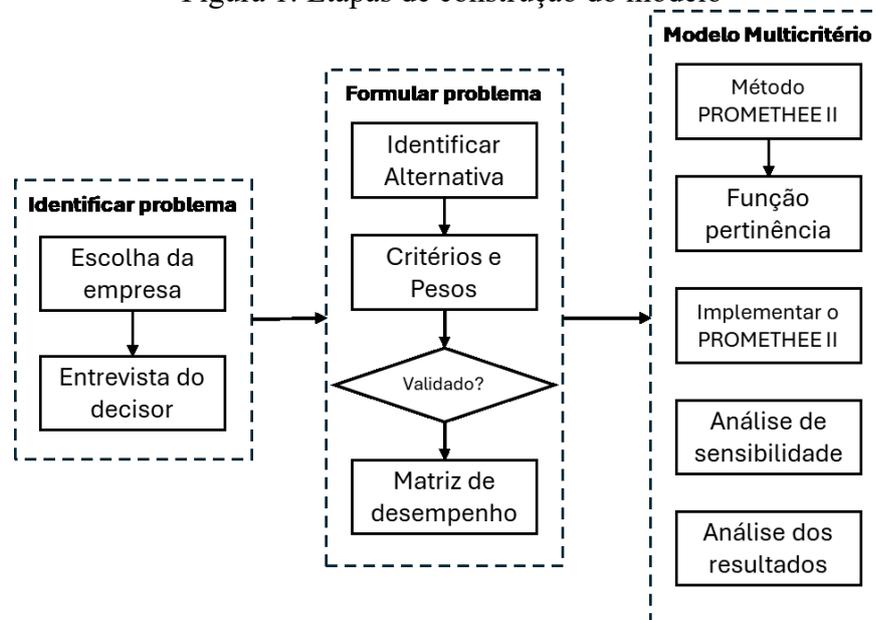


PROMETHEE (Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation) buscam com simplicidade, estabilidade e clareza construir relações de sobreclassificação de valores em problemas de tomada de decisão (VINCKE, 1992). Estes métodos têm abordagem não compensatória e envolvem conceitos e parâmetros com interpretação de fácil compreensão pelos decisores (ALMEIDA, 2013).

3 Metodologia

O estudo em questão desenvolver um modelo de decisão multicritério para elencar a ordem de prioridade das ações de sustentabilidade 4.0 numa empresa de geração e transmissão de energia utilizando o método de Sobreclassificação PROMETHEE II. A Figura 1 apresenta as etapas de construção do modelo de decisão multicritério para elencar a ordem de prioridade das ações de sustentabilidade 4.0.

Figura 1: Etapas de construção do modelo



Fonte: Sousa et al. (2018).

Na fase de identificação do problema, é possível destacar que a empresa de geração e transmissão de energia estudada é uma organização de grande porte que atua no setor de geração e transmissão de energia elétrica. Possui aproximadamente 3.200 funcionários, dos quais 2.000 estão diretamente ligados à produção. A organização tem pouco mais de 70 anos de criação e é altamente representativa no mercado regional. Implementou um setor focado em sustentabilidade 4.0 que tem o objetivo de enquadrar a organização nos padrões da sustentabilidade 4.0 até 2025. Para o alcance desse propósito, na entrevista com o gestor, foram elencados 8 metas ou projeto visando a sustentabilidade 4.0, esses projetos foram transformados em alternativas visando o alcance da sustentabilidade 4.0 e estão apresentados no Quadro 1. Para preservar o sigilo da empresa estudada, a organização passará a ser referida neste artigo pelo nome fictício de ENERGY.



Quadro 1: Projetos/alternativas para alcance da sustentabilidade 4.0

Código	Alternativa	Descrição/Objetivo
A1	Alavancagem do Capital Humano	Preparação para o projeto realizando o diagnóstico da situação atual, listando expertises necessárias para melhorar atuação profissional e geração dos modelos propostos com estudo do ciclo de vida do empregado.
A2	Gestão Sustentável de Fornecedores	Mapeamento de fornecedores em seus diversos níveis, estabelecimento de processos estruturados, mapeamento e melhoria dos processos, organização do banco de fornecedores pré-qualificados.
A3	Compromisso do diálogo e transparência com os Stakeholders	Mapeamento das ações de engajamento dos stakeholders, elaboração de regulamento de gestão e comunicação de crises, programa para lideranças, programa para benchmarking, canal corporativo de comunicação.
A4	Aprimoramento das práticas de governança	Alinhamento de pareceres junto ao jurídico, como também com relação a outras áreas envolvidas como investidores, financeiro, mercado, revisão de normativos e aprovação dos órgãos controladores.
A5	Aprimoramento da qualificação dos fatores Socioambientais na Gestão de Riscos	Mapeamento dos aspectos socioambientais, construção de cenários de impacto, P&D, benchmarking, planejamento conjunto, identificação dos gaps e respostas aos mesmos.
A6	Compensação das emissões de GEE e proteção do meio ambiente	Garantir o cumprimento de metas de redução e promoção de eventos de baixo carbono através de compensações, investimentos e ações contínuas.
A7	Certificação da energia proveniente de fontes limpas	Contratação de consultoria, elaboração do projeto, participação em seminários, apresentação à diretoria. Implantação, monitoramento, certificação, reavaliação periódica.
A8	Gestão Sustentável do Capital Financeiro	Racionalização das participações societárias, implantação do orçamento base zero, otimização da estrutura de dívida, monitoramento, reavaliação e execução das iniciativas.

Ainda na entrevista com o gestor (o decisor em questão foi um representante da área de planejamento estratégico da empresa ENERGY), optou-se por utilizar a estrutura P, I, Q como a mais apropriada para refletir as preferências do Decisor em relação ao problema em discussão. Isso permite que ele expresse suas preferências entre duas alternativas, considerando situações de preferência estrita (P), de indiferença (I) ou de preferência fraca (Q), a fim de estabelecer uma ordem completa entre as alternativas.

Assim, foi sugerida a adoção de um método de racionalidade não-compensatória, o que significa que uma alternativa mal avaliada em um critério não será compensada por uma excelente avaliação em outro critério. A natureza não-compensatória é crucial devido à natureza dos critérios em questão, pois esse método diminui a probabilidade de dispersão dos dados (FISHBURN, 1976).

Dessa maneira, devido à natureza do problema de ordenação e à abordagem não compensatória requerida, foi decidido adotar o Método de Sobreclassificação PROMETHEE



II. Este método, baseado no indicador de fluxo líquido, classifica as alternativas em uma ordem decrescente de eficiência, estabelecendo uma ordenação completa entre elas. A escolha foi influenciada, também, pela possibilidade de ocorrência de incomparabilidade no PROMETHEE I (BRANS; VINCKE, 1985).

Para aplicar o Método de Sobreclassificação, é necessário determinar os pesos relativos dos critérios, representando sua importância relativa (BELTON; STEWART, 2002). Uma vantagem do PROMETHEE II é sua flexibilidade na determinação desses pesos, pois não há uma regra fixa para sua elicitação (GOMES; GOMES, 2012). Os valores atribuídos aos pesos variam de 0 a 1, onde o peso mais alto indica maior importância relativa atribuída pelo Decisor, enquanto o mais baixo indica menor importância relativa.

Em relação ao tipo de critério, optou-se por utilizar o critério "usual" ou "verdadeiro critério" para todos os critérios. Isso elimina a necessidade de definir os parâmetros p e q , simplificando o entendimento do Decisor em relação ao modelo de decisão (ALMEIDA, 2013). A função de preferência para um critério usual é determinada pela equação apresentada.

$$\{f(a, b) = 1 \text{ se } g(a) - g(b) > 0 \quad f(a, b) = 0 \text{ se } g(a) - g(b) \leq 0$$

Onde: $f(a, b)$ representa a função diferença $[g(a) - g(b)]$ entre o desempenho das alternativas para cada critério n . Com base em todas as informações coletadas até este ponto, procede-se à comparação par a par das alternativas em relação aos critérios definidos. Além das alternativas identificadas, o problema de decisão conta com três critérios de escolha apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Descrição dos critérios

Critério	Nome	Descrição	Objetivo	Importância relativa	Escala
C1	Mão de obra qualificada	Profissionais altamente capacitados e especializados para atuar em funções técnicas e estratégicas nas ações do projeto	Minimizar	0,3	Ordinal
C2	Tempo de implementação	Estimativa segura sobre os prazos e suas etapas de execução conforme desdobramentos das tarefas levando em consideração interdependências	Minimizar	0,3	Intervalar (meses)
C3	Urgência	Ações que requerem iniciativas imediatas, por ser muito delicada, importante, grave ou gerar grande volume de interdependências	Maximizar	0,4	Ordinal

Os pesos dos critérios (Importância relativa) foram definidos em reunião com decisor e estão demonstrados na Quadro 2. O critério "urgência" foi considerado o mais importante e por isso de maior peso, por refletir mais o impacto nos resultados da empresa. Para o critério C1 e C3 foi utilizada uma escala de 1 a 5. Considerado respectivamente 1 como sem mão de obra qualificada e 5 com alta demanda de mão de obra qualificada; 1 como nada urgente e 5 como muito urgente. Para o critério C2 foi utilizada uma escala intervalar em meses. A diferença nas escalas não afeta a simulação do modelo uma vez que é realizada a comparação par-a-par das alternativas para cada critério.



A partir das informações colocadas anteriormente, a simulação do método PROMETHEE foi iniciada a partir dos procedimentos descritos em Almeida (2013) onde o autor afirma que este método tem duas fases: (i) construção de uma relação de sobreclassificação para agregar informações entre alternativas e critérios e (ii) exploração dessa relação para apoiar a decisão (BRANS; MARESCHAL, 2002). O decisor precisa estabelecer para cada critério um peso p_i que reflete a importância deste critério. Com esses pesos é obtido $\pi(a,b)$, ou seja, o grau de classificação de a sobre b para cada par de alternativas (a,b) . Obtido com a fórmula:

$$\pi(a, b) = \sum_{i=1}^n p_i F_i(a, b) \text{ Onde:}$$

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1$$

onde $F_i(a, b) = 0$ se $g_i(a) \leq g_i(b)$ e $F_i(a, b) = 1$ se $g_i(a) > g_i(b)$

Estima-se o valor de $F_j(a, b)$ através de seis formas de curvas e qual é a melhor para a análise de cada critério, indicando a intensidade da preferência da diferença $g_j(a) - g_j(b)$, utilizado o critério usual. Os procedimentos são feitos de forma separada para cada critério. No método PROMETHEE se estabelece uma estrutura de preferência entre as alternativas discretas, criando assim, uma função de preferência entre as alternativas para cada critério. Nessa função é apontado a intensidade da preferência de uma alternativa em relação à outra, com o valor variando entre 0, que significa indiferença, e 1, que simboliza preferência total (ALMEIDA, 2013). Dentre as variações do PROMETHEE, escolheu-se o PROMETHEE II.

Após as etapas percorridas no tópico anterior, para finalizá-lo de acordo com o método PROMETHEE II, utiliza-se o fluxo líquido $\Phi(a)$ que é calculado da seguinte forma: $\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a)$. Baseado no indicador $\Phi(a)$ as alternativas são dispostas na ordem decrescente; estabelecendo assim, uma ordem completa entre as alternativas (BRANS; MARESCHAL, 2002).

Belton e Stewart (2002) destacam a importância da realização de análises de sensibilidade e robustez para validar os dados de entrada e os parâmetros adotados em um modelo de decisão proposto, após a ordenação das alternativas. A análise de sensibilidade é fundamental para avaliar a sensibilidade da alternativa identificada às mudanças nas preferências do Decisor. Essa análise é conduzida manipulando os parâmetros do modelo para verificar a robustez das alternativas sob diferentes cenários.

Dois cenários foram propostos para realizar essas análises. No Cenário I, uma variação de 5% a mais foi aplicada ao critério com maior importância relativa, enquanto o restante da variação foi distribuído proporcionalmente entre os outros critérios. No Cenário II, uma variação de 10% a mais foi aplicada ao critério com maior importância relativa, com a distribuição proporcional da variação nos outros critérios.

4 Resultados

Baseado nos Quadros 1 e 2, é aplicado o método de decisão multicritério PROMETHEE II na empresa Energy. A matriz de desempenho das alternativas nos diferentes critérios, representada no Quadro 3, foi desenvolvida com apoio do decisor.



Quadro 3: Matriz de desempenho das alternativas nos diferentes critérios

Alternativas	Critérios		
	C1	C2	C3
A1- Alavancagem do Capital Humano	3,2	31	2
A2- Gestão Sustentável de Fornecedores	4	9	3,5
A3- Compromisso do diálogo e transparência com os Stakeholders	3	32	2,5
A4- Aprimoramento das práticas de governança	2,5	17	3,75
A5- Aprimoramento da qualificação dos fatores Socioambientais na Gestão de Riscos	5	19	4,5
A6- Compensação das emissões de GEE e proteção do meio ambiente	4,5	86	4
A7- Certificação da energia proveniente de fontes limpas	3,5	14	2,3
A8- Gestão Sustentável do Capital Financeiro	3,75	48	3

Com a matriz de desempenho das alternativas nos diferentes critérios desenvolvidas, é implementado o método PROMETHEE II com os dados, como demonstrado no Quadro 4, para o desenvolvimento da comparação par-a-par é utilizada a função de preferência para um critério usual.

Quadro 4: Implementação do PROMETHEE II

Par de alternativas		Critérios		
		C1	C2	C3
		0,3	0,3	0,4
A1	A2	1	0	0
A1	A3	0	1	0
A1	A4	0	0	0
A1	A5	1	0	0
A1	A6	1	1	0
A1	A7	1	0	0
A1	A8	1	1	0
A2	A1	0	1	1
A2	A3	0	1	1
A2	A4	0	1	0
A2	A5	1	1	0



A2	A6	1	1	0
A2	A7	0	1	1
A2	A8	0	1	1
A3	A1	1	0	1
A3	A2	1	0	0
A3	A4	0	0	0
A3	A5	1	0	0
A3	A6	1	1	0
A3	A7	1	0	1
A3	A8	1	1	0
A4	A1	1	1	1
A4	A2	1	0	1
A4	A3	1	1	1
A4	A5	1	1	0
A4	A6	1	1	0
A4	A7	1	0	1
A4	A8	1	1	1
A5	A1	0	1	1
A5	A2	0	0	1
A5	A3	0	1	1
A5	A4	0	0	1
A5	A6	0	1	1
A5	A7	0	0	1
A5	A8	0	1	1
A6	A1	0	0	1
A6	A2	0	0	1
A6	A3	0	0	1
A6	A4	0	0	1
A6	A5	1	0	0
A6	A7	0	0	1
A6	A8	0	0	1
A7	A1	0	1	1
A7	A2	1	0	0
A7	A3	0	1	0



A7	A4	0	1	0
A7	A5	1	1	0
A7	A6	1	1	0
A7	A8	1	1	0
A8	A1	0	0	1
A8	A2	1	0	0
A8	A3	0	0	1
A8	A4	0	0	0
A8	A5	1	0	0
A8	A6	1	1	0
A8	A7	0	0	1

Ao aplicar a equação para cálculo do grau de sobreclassificação das alternativas e a demais demonstradas, é obtido o fluxo de saída e entrada do método PROMÉTHÉE II, conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5: Fluxo de saída e entrada

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	$\Phi+$
A1	0,0	0,03	0,03	0,0	0,03	0,06	0,03	0,06	0,24
A2	0,07	0,0	0,07	0,03	0,06	0,06	0,07	0,07	0,43
A3	0,07	0,03	0,0	0,0	0,03	0,06	0,07	0,06	0,32
A4	0,10	0,07	0,10	0,0	0,06	0,06	0,07	0,10	0,56
A5	0,07	0,03	0,07	0,04	0,0	0,07	0,04	0,07	0,39
A6	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,0	0,04	0,04	0,27
A7	0,07	0,03	0,03	0,03	0,06	0,06	0,0	0,06	0,34
A8	0,04	0,03	0,04	0,0	0,03	0,06	0,04	0,0	0,24
$\Phi-$	0,46	0,26	0,38	0,14	0,30	0,43	0,36	0,46	

Por fim, a diferença entre os dois fluxos expõe a classificação por ordem crescente dos fluxos, alcançando então a classificação final do método mostrado no Quadro 6. É possível observar que a soma dos fluxos líquidos das alternativas do PROMÉTHÉE II precisa ser igual a zero. Os projetos A8 e A1 tiveram a mesma pontuação e o mesmo valor de $\Phi+$ e $\Phi-$. Por isso, a decisão foi tomada de acordo com a comparação do valor de urgência de cada um, pois é o critério com maior peso.



Quadro 6: Priorização de classificação PROMETHEE II.

Ordem	Priorização	
	Projeto	Φ
1º	A4- Aprimoramento das práticas de governança	0,42
2º	A2- Gestão Sustentável de Fornecedores	0,17
3º	A5- Aprimoramento da qualificação dos fatores Socioambientais na Gestão de Riscos	0,09
4º	A7- Certificação da energia proveniente de fontes limpas	-0,02
5º	A3- Compromisso do diálogo e transparência com os Stakeholders	-0,06
6º	A6- Compensação das emissões de GEE e proteção do meio ambiente	-0,16
7º	A8- Gestão Sustentável do Capital Financeiro	-0,22
8º	A1- Alavancagem do Capital Humano	-0,22

Após a ordenação das alternativas, procedeu-se à análise de sensibilidade e robustez, utilizando dois cenários distintos. No Cenário I, uma variação de 5% a mais foi aplicada ao critério "Urgência" (C3), que possui a maior importância relativa no modelo (0,4), enquanto o restante da variação foi distribuído proporcionalmente entre os outros critérios. Já no Cenário II, uma variação de 10% a mais foi aplicada ao mesmo critério, mantendo a distribuição proporcional da variação nos demais critérios. Nos resultados das análises de sensibilidade não houve variações e confirma a posição da A8 sobre a A1, conforme mostrado no Quadro 7.

Quadro 7: Análise de sensibilidade do modelo (variação de 5% e 10%).

Ordem	Priorização		
	Projeto	Φ (5%)	Φ (10%)
1º	A4	0,416	0,412
2º	A2	0,171	0,172
3º	A5	0,107	0,124
4º	A7	-0,036	-0,052
5º	A3	-0,068	-0,076
6º	A6	-0,138	-0,116
7º	A8	-0,216	-0,212
8º	A1	-0,236	-0,252

Desta maneira os três Projetos/alternativas prioritários alcance da sustentabilidade 4.0, seguindo os critérios utilizados e a escolha do decisor são: Aprimoramento das práticas de governança, Gestão Sustentável de Fornecedores e Aprimoramento da qualificação dos fatores Socioambientais na Gestão de Riscos. A utilização do método PROMÉTHÉE II contribui e dá suporte aos decisores na ordenação dos projetos, definindo assim suas prioridades. O método permite que cada alternativa de projeto seja comparada com as demais,



na ótica de todos os critérios. Isso evita reduzir decisões tomadas na intuição, mas sim, com respaldo.

Com base nos resultados apresentados, fica evidente o potencial do método de decisão multicritério PROMETHEE II na empresa Energy, especialmente quando se trata de priorizar projetos alinhados com os princípios da sustentabilidade. A análise detalhada das alternativas nos diferentes critérios permite uma avaliação holística, considerando não apenas o impacto econômico, mas também as dimensões sociais e ambientais. Essa abordagem oferece uma estrutura robusta para a tomada de decisões, permitindo que os gestores avaliem e comparem as diferentes opções de investimento com base em critérios objetivos e transparentes.

Nesse sentido, a visão dos autores descritos na fundamentação teórica em relação aos resultados apresentados destaca a importância de uma abordagem integrada e holística para a sustentabilidade empresarial (Filgueira et al., 2024). Motta et al., (2022) enfatizam a relevância da abordagem de sustentabilidade 4.0, que integra os princípios da sustentabilidade com as tecnologias emergentes da Indústria 4.0.

Reis et al., (2021) e Javaid et al., (2022) destacam a relevância da abordagem de sustentabilidade 4.0, que integra os princípios da sustentabilidade com as tecnologias emergentes da Indústria 4.0. Os autores argumentam que essa integração permite que as empresas busquem soluções inovadoras que promovam o desenvolvimento sustentável em todas as suas dimensões, gerando valor de forma sustentável.

5 Considerações finais

A metodologia aplicada através do multicritério de apoio a tomada de decisão oferece robustez às análises e é utilizada em diversas áreas e pesquisas abordando de maneira quantitativa e qualitativa as variáveis. Dado a grande importância da temática abordada, acrescentado o abismo entre os conceitos e práticas da Sustentabilidade nas empresas, esta pesquisa oferece uma importante contribuição. Ao desenvolver a abordagem, a pesquisa consegue analisar de forma quantitativa as variáveis relacionadas à sustentabilidade, permitindo uma avaliação mais abrangente e fundamentada. Além disso, ao reconhecer o abismo entre os conceitos teóricos e as práticas efetivas de sustentabilidade nas empresas, essa pesquisa busca preencher essa lacuna ao oferecer insights e diretrizes para uma tomada de decisão mais alinhada com os princípios sustentáveis. Assim, ao fornecer uma abordagem metodológica sólida e relevante para a análise e priorização de questões relacionadas à sustentabilidade, essa pesquisa contribui significativamente para a promoção de práticas empresariais mais sustentáveis e responsáveis.

O método tem por objetivo definir as prioridades entre as alternativas e critérios considerados estratégicos, onde as análises aprofundadas demonstraram uma ordenação consistente sobre qual projeto priorizar na iniciação e realização, como confirmado pela análise de sensibilidade. A consistência na ordenação das alternativas fica evidente durante o processo de aplicação do método PROMETHEE II a partir da comparação das alternativas de forma sistemática e objetiva, levando em consideração múltiplos critérios ponderados pelo decisor.

A ordenação obtida através do método Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE II) enfatizou nas três primeiras posições, a necessidade de aprimoramento das práticas de governança, a gestão sustentável de fornecedores, e aprimoramento da qualificação dos fatores socioambientais na gestão de risco, considerados como mais relevantes entre as alternativas elencadas, respectivamente. Os resultados da



análise de sensibilidade com variação dos pesos dos critérios em 5% e 10% foram iguais, ou seja, sem variações, porque o método PROMETHEE II demonstrou uma robustez consistente na ordenação das alternativas mesmo diante de pequenas variações nos pesos dos critérios. Isso sugere que a priorização das alternativas não é sensível a pequenas mudanças nos critérios, indicando uma estabilidade nos resultados. Em algumas situações, outros métodos podem não apresentar a mesma estabilidade quando há variações nos pesos dos critérios, o que poderia resultar em diferentes ordenações das alternativas. No entanto, no caso do PROMETHEE II neste estudo, a ordem de prioridade das alternativas permaneceu a mesma mesmo com variações nos pesos dos critérios.

Desta maneira, A aplicação do método PROMETHEE II apresentou resultados que podem efetivamente auxiliar a gestão na tomada de decisão sobre o projeto de Sustentabilidade 4.0. Isso se deve ao fato de que o método PROMETHEE II é projetado para lidar com múltiplos critérios e alternativas de forma sistemática e robusta, fornecendo uma ordenação clara das alternativas de acordo com as preferências do decisor.

Além disso, considerando que o projeto de Sustentabilidade 4.0 é estratégico e de longo prazo, a utilização do PROMETHEE II pode contribuir significativamente para que áreas e profissionais atuem com racionalidade no processo decisório. Isso ocorre porque o método permite uma análise abrangente e ponderada das alternativas, levando em conta não apenas um único critério, mas vários, refletindo assim a complexidade e as múltiplas dimensões envolvidas no projeto de sustentabilidade.

A robustez do método, como evidenciado pela consistência dos resultados mesmo diante de variações nos pesos dos critérios, oferece uma base sólida para a tomada de decisão. Isso permite que os gestores tenham confiança de que estão escolhendo as alternativas mais adequadas de acordo com as prioridades estabelecidas.

Portanto, a aplicação do método PROMETHEE II neste contexto oferece uma ferramenta valiosa para a gestão na tomada de decisão sobre o projeto de Sustentabilidade 4.0, promovendo uma abordagem mais racional, informada e estratégica.

Apesar dos resultados gerados pela aplicação serem considerados satisfatórios, de maneira prática eles contextualizam as variadas possibilidades de análises que podem apoiar a tomada de decisão amadurecida através do desenvolvimento científico e acadêmico. É ainda assim auxiliando profissionais a preparar, mapear e alinhar realizando comparações par a par, podendo-se a todo tempo incluir critérios e alternativas para ampliação da análise. Vale destacar que apesar do modelo proposto ser aplicado em uma empresa, ele pode ser adaptado de acordo com a necessidade da empresa que deseja priorizar ações de sustentabilidade 4.0.

Entre as limitações do estudo estão a aplicação em apenas uma empresa, número reduzido de indicadores identificados, dificuldades estratégicas sobre a decisão exclusiva de um único representante, consistência dos pesos não aprovada pela presidência/conselho, entre outros.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio recebido para a realização deste estudo da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE).



Referências bibliográficas

- ALMADA-LOBO, Francisco. The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). **Journal of innovation management**, v. 3, n. 4, p. 16-21, 2015.
- ALMEIDA, ADIEL TEIXEIRA DE. **Processo de decisão nas organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério**. São Paulo: Atlas, 2013.
- ARAÚJO, Afrânio Galdino de; ALMEIDA, Adiel Teixeira de. Apoio à decisão na seleção de investimentos em petróleo e gás: uma aplicação utilizando o método PROMETHEE. **Gestão & Produção**, v. 16, n. 4, p. 534-543, 2009.
- ARENA, M; TERTZ, S; CICERI, N; BENGIO, I. A state-of-the-art of industrial sustainability: definitions, tools and metrics. **International Journal of Product Lifecycle Management**, v. 4, n. 1/2/3, p. 207, 2010.
- ATHAWALE, Vijay Manikrao; CHAKRABORTY, Shankar. Facility location selection using PROMETHEE II method. **Proceedings of the 2010 international conference on industrial engineering and operations management**. Bangladesh Dhaka, 2010, p. 9-10.
- BAI, Chunguang et al. Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. **International journal of production economics**, v. 229, p. 107776, 2020.
- BARBOSA, G. DA S. O desafio do desenvolvimento sustentável. **Revista Visões**. v. 1, p. 179–182, 2008.
- BELTON, V.; STEWART, T. **Multiple criteria decision analysis: an integrated approach**. Boston: Springer, 2002.
- BONILLA, Silvia H. et al. Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. **Sustainability**, v. 10, n. 10, p. 3740, 2018.
- BRANS, J. P.; MARESCHAL, B. **PROMETHEE – GAIA: une méthodologie d'aide à La décision em présence de critères multiples**. Bruxelles: Éditions de L'Université de Bruxelles, 2002.
- BRANS, J. P.; VINCKE, P. H. A preference ranking organization method, the PROMETHEE method for MCDM. **Management Science**, v. 31, pp. 647-656, 1985.
- CAVALCANTE, Cristiano Alexandre Virgínio; ALMEIDA, Adiel Teixeira de. Modelo multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando PROMETHEE II em situações de incerteza. **Pesquisa Operacional**, 2005, v. 25, p. 279-296.
- COSTA, Edwaldo; FERREZIN, Nataly Bueno. ESG (Environmental, Social and Corporate Governance) e a comunicação: o tripé da sustentabilidade aplicado às organizações globalizadas. **Revista Alterjor**, v. 24, n. 2, p. 79-95, 2021.
- ELDEM, B., KLUCZEK, A., BAGIŃSKI, J. The COVID-19 impact on supply chain operations of automotive industry: A case study of sustainability 4.0 based on Sense–Adapt–Transform framework. **Sustainability**, 2022, 14(10), 5855.
- ELKINGTON, J. **Canibals with forks: the triple bottom line of 21st century business**. Canadá, v. 30, 1988.
- ELKINGTON, J. Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business. **Choice Reviews Online**, v. 36, n. 07, p. 36-3997-36–3997, 2013.



- FILGUEIRAS, I.F.L.V., MELO, F.J.C. Sustainability 4.0 in services: a systematic review of the literature. **Benchmarking: An International Journal**. In Press. 1-26, 2023.
- FISHBURN, P. C. Noncompensatory Preferences. **Synthese**. v. 33, n. 1, p. 393–403, 1976.
- FOFAN, Angela Cristina et al. An Integrated Methodology Using PROMETHEE and Kano's Model to Rank Strategic Decisions. **Engineering Management Journal**, v. 31, n. 4, p. 270-283, 2019.
- GABRIEL, Magdalena; PESSL, Ernst. Industry 4.0 and sustainability impacts: Critical discussion of sustainability aspects with a special focus on future of work and ecological consequences. **Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara**, v. 14, n. 2, p. 131, 2016.
- GHOBAKHLOO, Morteza. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, p. 119869, 2020.
- GOMES, LUIZ FLÁVIO AUTRAN MONTEIRO; GOMES, CARLOS FRANCISCO SIMÕES. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2012.
- GOMES, P. C., OLIVEIRA, J. C. F., TAVARES, K. J. T., GUIMARAES JUNIOR, D. S., MELO, F. J. C. Industry 4.0 maturity model: an assessment in manufacturing enterprises. **Intern. J. of Service Oper. Manag.** Pré-print. 2023.
- JACOBI, P.R. Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade. **Cadernos de pesquisa**, 2003, 118: 189-205.
- JAVAID, M., HALEEM, A., SINGH, R. P., KHAN, S., SUMAN, R. Sustainability 4.0 and its applications in the field of manufacturing. **Internet of Things and Cyber-Physical Systems**, 2022, 2, 82-90.
- LU, Yang. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of industrial information integration**, v. 6, p. 1-10, 2017.
- LUTHRA, Sunil; MANGLA, Sachin Kumar. Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 117, p. 168-179, 2018.
- MATA, V. S., COSTA, C. H. O., FERNANDES, D. C., SILVA, E. O., CARDOSO, F. A., ANDRADE, J. C., REZENDE, L. P. L., OLIVEIRA, M. F., SOUZA, N., MACHADO, P. E. V., RODRIGUES, R. P. M. Indústria 4.0: a Revolução 4.0 e o Impacto na Mão de Obra. **Ver. Ciên. Exa. Tecn.**, 13, p. 17-22, 2018.
- MOTTA REIS, J. S., ESPUNY, M., CARDOSO, R. P., DE SOUZA SAMPAIO, N. A., DE BARROS, J. G. M., BARBOSA, L. C. F. M., DE OLIVEIRA, O. J. Mapping Sustainability 4.0: contributions and limits of the symbiosis. **Revista de Gestão e Secretariado**, 2022, 13(3), 1426-1438.
- MÜLLER, Bernhard; HERZOG, Otthein (Ed.). Industry 4.0 and Urban Development: The Case of India. acatech, **National Academy of Science and Engineering**, 2015.
- NAYYAR, A.; KUMAR, A. **A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development**, Vol. 1, Springer, Cham. 2020.
- OLIVEIRA, F. T. DE; SIMÕES, W. L. A Indústria 4.0 e a produção no contexto dos estudantes da engenharia. **Simpósio de Engenharia de Produção**, v. 1, p. 6, 2017.



OLIVEIRA, L; RAFFAELA, M; PEDRO, B; QUELHAS, O. Sustentabilidade: da evolução dos conceitos à implementação como estratégia nas organizações. **Production**, v. 22, n. 1, p. 70–82, 2011.

PORTILHO, F. **Sustentabilidade ambiental, consumo e cidadania**. Cortez, 2005.

SILTORI, Patricia Fernanda da Silva, Análise dos impactos da Indústria 4.0 na sustentabilidade empresarial / Patricia Fernanda da Silva Siltori. – Campinas, SP, 2020.

POSADA, Jorge et al. Visual computing as a key enabling technology for industrie 4.0 and industrial internet. **IEEE computer graphics and applications**, v. 35, n. 2, p. 26-40, 2015.

REIS, J. S. D. M., ESPUNY, M., NUNHES, T. V., SAMPAIO, N. A. D. S., ISAKSSON, R., CAMPOS, F. C. D., OLIVEIRA, O. J. D. Striding towards sustainability: A framework to overcome challenges and explore opportunities through industry 4.0. **Sustainability**, 2021, 13(9), 5232.

ROBLEK, Vasja; MEŠKO, Maja; KRAPEŽ, Alojz. A complex view of industry 4.0. **Sage Open**, v. 6, n. 2, p. 2158244016653987, 2016.

SAHOO, S., KUMAR, S., ABEDIN, M. Z., LIM, W. M., JAKHAR, S. K. Deep learning applications in manufacturing operations: a review of trends and ways forward. **Journal of Enterprise Information Management**, 2023, 36(1), 221-251.

SANTOS, L.B.D., MELO, F.J.C., GUIMARAES JUNIOR, D.S., SOBRAL, E.F.M., MEDEIROS, D.D. Application of ISM to Identify the Contextual Relationships between the Sustainable Solutions Based on the Principles and Pillars of Industry 4.0: A Sustainability 4.0 Model for Law Offices. **Sustainability**, 2023, 15(19), 14494.

SANTOS, Fábio Coelho Netto et al. Sustentabilidade empresarial e ESG: uma distinção imperativa. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 14, n. 1, p. 247-258, 2023.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. 1, São Paulo. Edipro, 2016.

SCHWAB, K., Davis, N. **Shaping the Future of the Fourth Industrial Revolution**. 2018. Crown.

SILVA, M.F.V.O.B., MELO, F.J.C. Sustainability 4.0 in the fashion industry: a systematic literature review. **International Journal Advanced Operations Management**. 2024. In Press. 1-31.

SOUSA, BRUNO CARLOS DA SILVA; RANGEL, LUÍS ALBERTO DUNCAN; HERNÁNDEZ, CECILIA TOLEDO. Priorização de projetos de melhoria de produtividade através do método multicritério Promethe II. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, Vol. 10, n.1, p.27-40, 2018.

TANVEER, M., BADSHAH, A., ALASMARY, H., CHAUDHRY, S. A. CMAF-IIoT: Chaotic map-based authentication framework for Industrial Internet of Things. **Internet of Things**, 23, 100902, 2023.

YIN, Y.; QIN, S. F. A smart performance measurement approach for collaborative design in Industry 4.0. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 11, n. 1, p. 1–15, 2019.

VINCKE, P. **Multicriteria decision-aid**. Bruxelles: John Wiley & Sons, 1992.