

Decisões estratégicas em ambientes complexos: a contribuição dos sistemas multicritério na nanotecnologia

Strategic decisions in complex environments: the contribution of multicriteria systems in nanotechnology

Liara Dai-pira Tasqueto^a, Patrinhês Aparecida França Zonatto^b,
William Leonardo da Silva^c, Lissandro Dorneles Dalla Nora^d

^a liara.dtasqueto@ufn.edu.br

^b patrineszonatto@gmail.com

^c w.silva@ufn.edu.br

^d lissandro@ufn.edu.br



Data de submissão: 16/12/2024

Data de aceite: 06/01/2025

Resumo

Objetivo: Investigar a aplicação de métodos multicritério, como o Processo de Análise Hierárquica (AHP) e a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), para otimizar decisões estratégicas em nanotecnologia. O estudo utiliza o software "MCDA Apoio à Decisão Ampliada", registrado no INPI, visando melhorar a precisão e a eficiência do processo decisório em ambientes complexos e de alta incerteza.

Metodologia: Foram aplicados métodos multicritério AHP e MAUT integrados em uma plataforma de software projetada para setores estratégicos. Estudos de caso foram conduzidos em empresas do setor eletrônico, com análise quantitativa e qualitativa de impactos em custos e produtividade, além de simulações de aplicação em áreas como energia renovável e saúde.

Resultados: A aplicação do software resultou em uma redução de 15% nos custos operacionais e um aumento de 10% na eficiência produtiva das empresas avaliadas. Além disso, houve maior assertividade na escolha de estratégias de inovação e adaptação do software para diferentes setores. A ferramenta provou ser flexível e escalável, promovendo decisões fundamentadas em critérios multidimensionais.

Implicações Práticas/Gerenciais: O software contribui para aumentar a precisão e a agilidade no processo decisório, minimizando erros humanos e promovendo o alinhamento com objetivos organizacionais e de sustentabilidade. Ele oferece suporte estratégico para gestores na seleção de inovações e otimização de recursos em setores de alta competitividade.

Implicações Sociais: A ferramenta possibilita decisões mais equilibradas, considerando fatores econômicos, sociais e ambientais. Isso promove um desenvolvimento sustentável, incentivando a inovação responsável em setores como energia renovável e saúde, com benefícios diretos para a sociedade e o meio ambiente.

Palavras-chave: Inovação tecnológica; Tomada de decisão multicritério; Sustentabilidade em nanotecnologia; Métodos quantitativos; Gestão estratégica.

Abstract

Objective: To investigate the application of multicriteria methods, such as the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Multi-Attribute Utility Theory (MAUT), to optimize strategic decision-making in nanotechnology. The study leverages the "MCDA Extended Decision Support" software, registered with the INPI, to enhance precision and efficiency in decision-making within complex and uncertain environments.

Methodology: Multicriteria methods AHP and MAUT were applied and integrated into a software platform designed for strategic sectors. Case studies were conducted in electronics companies, featuring quantitative and qualitative analyses of impacts on costs and productivity, along with simulations for applications in areas such as renewable energy and healthcare.

Results: The software's implementation led to a 15% reduction in operational costs and a 10% increase in productive efficiency for the evaluated companies. Additionally, it improved decision accuracy in selecting innovation strategies and demonstrated

adaptability across different sectors. The tool proved to be flexible and scalable, supporting decisions based on multidimensional criteria.

Practical/Managerial Implications: The software enhances precision and agility in the decision-making process, minimizing human errors while aligning with organizational and sustainability goals. It provides strategic support for managers in selecting innovations and optimizing resources in highly competitive sectors.

Social Implications: The tool enables more balanced decision-making by considering economic, social, and environmental factors. This fosters sustainable development, encouraging responsible innovation in sectors like renewable energy and healthcare, with direct benefits for society and the environment.

Keywords: Technological innovation; Multicriteria decision-making; Sustainability in nanotechnology; Quantitative methods; Strategic management.

1. Introdução

A nanotecnologia tem demonstrado um crescimento significativo nos últimos anos, consolidando-se como uma área essencial para o avanço tecnológico e a inovação em setores industriais. Suas aplicações abrangem uma ampla gama de setores, como cosméticos, eletrônicos, energia, alimentos, biotecnologia e farmacêutico, oferecendo soluções inovadoras para problemas globais e criando produtos com maior valor agregado (ABDI, 2015; Adil & Festel, 2017; Batyuk & Kizilova, 2022). Este avanço, entretanto, está associado a desafios importantes relacionados à complexidade da tomada de decisões, que envolve múltiplos critérios e incertezas, além da necessidade de considerar impactos econômicos, sociais e ambientais (Ong et al., 2020; Wang & Yeap, 2021).

A aplicação da nanotecnologia, especialmente no Brasil, apresenta um grande potencial para impulsionar a competitividade industrial, como demonstram iniciativas como a promovida pela ABDI (2015), que destaca os impactos positivos no desenvolvimento sustentável e na geração de novos mercados. Contudo, o ambiente decisório para tecnologias emergentes, como a nanotecnologia, é intrinsecamente complexo, exigindo ferramentas robustas e metodologias que considerem critérios diversos, como viabilidade técnica, custo-benefício e impacto ambiental (Macharis et al., 2009; Kaplan & Norton, 2008).

Nesse contexto, os métodos multicritérios de apoio à decisão (MCDA) têm se consolidado como abordagens eficazes para enfrentar os desafios da tomada de decisão em ambientes incertos. Técnicas como o Processo de Análise Hierárquica (AHP), amplamente reconhecido por sua capacidade de decompor problemas complexos em estruturas hierárquicas, permitem aos tomadores de decisão priorizar critérios e alternativas com base em suas preferências

(Saaty, 1980; Chaoire et al., 2017). Da mesma forma, a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) oferece uma abordagem personalizada para decisões estratégicas, permitindo análises que integram critérios qualitativos e quantitativos (Festel & Kratzer, 2012).

Além dessas metodologias, abordagens complementares como a Programação Multicritério (MCP) e a Análise Envoltória de Dados (DEA) têm demonstrado sua eficácia em problemas complexos. A MCP auxilia na identificação de soluções ótimas em cenários de múltiplos objetivos conflitantes, enquanto a DEA é amplamente utilizada para avaliar a eficiência relativa de unidades produtivas e alternativas (Ganga et al., 2016; Huang et al., 2024). No entanto, para lidar com as incertezas associadas ao uso de nanotecnologia, a literatura aponta para a importância de análises de sensibilidade e modelagem probabilística, garantindo que as decisões sejam robustas frente às mudanças do mercado e das tecnologias (Ong et al., 2020; Wang & Yeap, 2021).

A integração dessas metodologias em Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) tem permitido avanços significativos na gestão de incertezas em ambientes tecnológicos complexos. Ferramentas baseadas em MCDA podem ser configuradas para coletar e processar grandes volumes de dados em tempo real, oferecendo recomendações atualizadas e alinhadas às necessidades específicas de cada setor (Kaplan & Norton, 2008; Adil & Festel, 2017). Esse estudo propõe o desenvolvimento de um SSD voltado ao setor de cosméticos no estado do Rio Grande do Sul, região que se destaca pela adoção de nanotecnologia em produtos inovadores, com o objetivo de aumentar sua competitividade e sustentabilidade.

Os Sistemas de Suporte à Decisão, como o "MCDA Apoio à Decisão Ampliada", registrado no INPI, apresentam-se como ferramentas indispensáveis para a análise de alternativas em

ambientes complexos. Além de otimizar a eficiência operacional, esses sistemas promovem o alinhamento estratégico das decisões empresariais, oferecendo suporte robusto para atender às demandas globais de competitividade e inovação sustentável. A partir desse panorama, este estudo explora o potencial dessas ferramentas no setor de cosméticos e suas contribuições para a ampliação do impacto social e econômico da nanotecnologia no Brasil e no mundo.

2. Nanotecnologia e seus desafios

A nanotecnologia continua a impulsionar inovações em diversos setores econômicos, redefinindo processos produtivos, estratégias de mercado e padrões de consumo. Sua capacidade de manipular materiais em escala nanométrica oferece uma combinação única de eficiência e sustentabilidade, criando produtos mais leves, duráveis e ambientalmente amigáveis. Setores como cosméticos, eletrônicos, alimentos, biotecnologia, energia renovável e farmacêutico têm sido profundamente transformados por essa tecnologia, que permite o desenvolvimento de soluções altamente especializadas e adaptadas às necessidades de mercado (ABDI, 2015; Adil & Festel, 2017; Batyuk & Kizilova, 2022).

No setor de cosméticos, por exemplo, a nanotecnologia possibilita o desenvolvimento de formulações mais eficazes, com propriedades de maior penetração cutânea, absorção otimizada de ativos e resistência prolongada a fatores ambientais, como a radiação ultravioleta. Empresas como L'Oréal e BASF têm liderado esse movimento, investindo em nanopartículas para oferecer produtos mais eficazes e

sustentáveis. No entanto, a adoção dessa tecnologia apresenta desafios significativos, incluindo a conformidade regulatória, o custo de produção e as preocupações com segurança e aceitação do consumidor (Festel & Kratzer, 2012). Esses desafios são ainda mais relevantes no Brasil, onde o setor de cosméticos desempenha um papel estratégico no desenvolvimento econômico regional, como no Rio Grande do Sul, onde empresas buscam diferenciação através da incorporação de inovações tecnológicas.

Embora o setor de cosméticos seja um dos mais promissores, outros setores também têm se beneficiado amplamente da nanotecnologia. No setor de alimentos, nanomateriais têm sido utilizados para criar embalagens inteligentes, capazes de monitorar a qualidade e prolongar a validade dos produtos. Essas inovações ajudam a reduzir o desperdício alimentar e a melhorar a eficiência na cadeia de suprimentos, mas demandam uma análise detalhada sobre custos e impactos ambientais (Batyuk & Kizilova, 2022). Na energia renovável, a nanotecnologia tem permitido avanços importantes em dispositivos como painéis solares e baterias de lítio, aumentando sua eficiência energética e viabilizando soluções mais acessíveis para a transição energética global (Gouvea, 2010). O Quadro 1 apresenta os benefícios e desafios relacionados aos principais setores desse estudo.

Além dos benefícios técnicos, é crucial considerar os impactos sociais e econômicos da nanotecnologia. No setor de saúde, por exemplo, nanopartículas têm sido usadas no desenvolvimento de medicamentos e diagnósticos médicos, oferecendo tratamentos mais eficazes e acessíveis. No entanto, a democratização dessas inovações exige soluções que equilibrem os benefícios econômicos com as necessidades de

Quadro 1. Aplicações, benefícios e desafios da nanotecnologia por setor.

Setor	Aplicações	Benefícios	Desafios
Cosméticos	Nanopartículas em cremes e protetores solares	Maior eficácia, melhor absorção e maior proteção contra UV	Conformidade regulatória e custos de produção elevados
Alimentos	Embalagens inteligentes com nanomateriais para conservação de alimentos	Prolonga a validade, reduz desperdícios e melhora a segurança alimentar	Aceitação do consumidor e compatibilidade ambiental
Saúde	Diagnósticos médicos avançados e liberação controlada de medicamentos	Precisão em diagnósticos, tratamentos mais eficazes e acessíveis	Altos custos de pesquisa e desenvolvimento, e questões éticas
Energia renovável	Nanotecnologia em painéis solares e baterias de alta eficiência	Maior eficiência energética e redução de custos ambientais	Custo inicial elevado e desafios na escalabilidade

Fonte: Adaptado da pesquisa dos autores.

acessibilidade e conformidade regulatória. Da mesma forma, na biotecnologia, a aplicação de nanomateriais em processos produtivos enfrenta desafios éticos e de sustentabilidade, especialmente em áreas relacionadas à saúde pública e segurança alimentar (Macharis & Bernardini, 2015; Wang & Yeap, 2021).

O Brasil tem avançado em iniciativas que destacam a nanotecnologia como uma prioridade estratégica para o desenvolvimento econômico. Programas como os promovidos pela ABDI (2015) reforçam o papel dessa tecnologia no fortalecimento da competitividade industrial e na criação de novos mercados. No entanto, a integração da nanotecnologia em qualquer setor requer uma abordagem estruturada e flexível, capaz de lidar com a complexidade de decisões que envolvem múltiplos critérios e incertezas. Ferramentas que promovam a análise holística dessas variáveis são indispensáveis para potencializar os benefícios dessa tecnologia.

3. MCDA como ferramenta de apoio à decisão

Diante da crescente complexidade e incertezas associadas à nanotecnologia, os métodos multicritérios de apoio à decisão (MCDA) têm se destacado como ferramentas essenciais para a avaliação e escolha de alternativas. O MCDA oferece uma abordagem estruturada que permite aos tomadores de decisão integrar diferentes critérios qualitativos e quantitativos, frequentemente conflitantes, em análises

robustas e fundamentadas. Essa abordagem é particularmente relevante em setores como cosméticos, alimentos, energia renovável e saúde, onde os desafios associados à adoção de nanotecnologia são multidimensionais (Saaty, 1980; Chaoire *et al.*, 2017).

O Quadro 2 resume as principais metodologias multicritérios utilizadas no SSD, destacando seus objetivos, vantagens e limitações, proporcionando uma visão comparativa das técnicas aplicadas em contextos de alta complexidade decisória.

No setor de cosméticos, o MCDA tem sido amplamente utilizado para facilitar decisões estratégicas sobre a implementação de nanopartículas em formulações. Essas decisões envolvem critérios como custo-benefício, impacto ambiental, viabilidade técnica e conformidade com regulamentações. Por exemplo, empresas que investem em ativos nanotecnológicos precisam avaliar alternativas que ofereçam maior eficácia, ao mesmo tempo em que reduzem os custos de produção e minimizam os impactos ambientais (Batyuk & Kizilova, 2022). O Processo de Análise Hierárquica (AHP) é uma das metodologias mais aplicadas nesse contexto, permitindo priorizar critérios com base nas preferências específicas das empresas e no comportamento do mercado.

Além do setor de cosméticos, o MCDA também se mostrou eficaz em áreas como alimentos e energia renovável. Na indústria alimentícia, por exemplo, pode ser utilizado para avaliar tecnologias de embalagem baseadas em

Quadro 2. Comparação das metodologias multicritérios (MCDA) utilizadas no SSD.

Metodologia	Objetivo	Vantagens	Limitações
AHP (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)	Hierarquizar e priorizar alternativas baseando-se em critérios estruturados em uma hierarquia.	Simplicidade no uso; permite decomposição de problemas complexos; integra julgamentos qualitativos e quantitativos.	Pode ser subjetivo; sensível às inconsistências nos julgamentos dos critérios.
MAUT (<i>Multi-Attribute Utility Theory</i>)	Avaliar múltiplos critérios considerando as preferências do tomador de decisão.	Personalização baseada nas preferências; ideal para cenários onde critérios qualitativos predominam.	Exige que preferências sejam claramente definidas; pode ser complexo em cenários amplos.
MCP (<i>Multi-Criteria Programming</i>)	Identificar soluções ótimas em cenários com múltiplos objetivos conflitantes.	Permite a análise simultânea de objetivos conflitantes; ideal para soluções otimizadas.	Pode ser matematicamente complexo; requer dados precisos e bem definidos.
DEA (<i>Data Envelopment Analysis</i>)	Avaliar a eficiência relativa de unidades decisórias comparando insumos e resultados.	Identifica ineficiências; útil para benchmarking e comparações de desempenho.	Não incorpora critérios qualitativos; é limitado a métricas quantitativas.

Fonte: Adaptado da pesquisa dos autores.

nanomateriais, considerando fatores como segurança alimentar, aceitação do consumidor e impacto ambiental. Na energia renovável, o MCDA auxilia na escolha de soluções tecnológicas para geração e armazenamento de energia, garantindo uma análise equilibrada entre custos iniciais e benefícios de longo prazo (Gouvea, 2010). A Programação Multicritério (MCP) e a Análise Envoltória de Dados (DEA) complementam essa análise, permitindo identificar alternativas mais eficientes e sustentáveis (Macharis & Bernardini, 2015; Wang & Yeap, 2021).

Outro setor que se beneficia significativamente do MCDA é o farmacêutico. Na pesquisa e desenvolvimento de medicamentos baseados em nanotecnologia, o MCDA oferece suporte para avaliar múltiplos critérios, como eficácia terapêutica, segurança, custo de produção e acessibilidade. Essa abordagem é essencial para alinhar as inovações tecnológicas com os requisitos regulatórios e as necessidades do mercado, especialmente em contextos de saúde pública (Adil & Festel, 2017).

A integração de MCDA com tecnologias emergentes, como big data e inteligência artificial, amplia ainda mais seu potencial. Sistemas híbridos que combinam MCDA com algoritmos de aprendizado de máquina podem prever tendências de mercado, ajustar pesos de critérios em tempo real e oferecer soluções adaptativas que respondem às mudanças no ambiente competitivo. Essa integração é particularmente relevante em setores como energia e biotecnologia, onde as demandas de mercado e as regulamentações estão em constante evolução (Huang *et al.*, 2024).

Por fim, o MCDA não é apenas uma ferramenta analítica, mas uma estratégia de inovação que transforma a forma como decisões são tomadas em setores complexos. Sua aplicação em cosméticos, alimentos, energia renovável, saúde e biotecnologia demonstra sua versatilidade e impacto. Além de promover competitividade e sustentabilidade, o MCDA permite que as empresas se alinhem às demandas globais por soluções mais inteligentes e eficazes, consolidando seu papel como uma solução indispensável no contexto da nanotecnologia.

4. Metodologia

A metodologia deste estudo foi concebida para desenvolver e aplicar um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) especializado, voltado

para enfrentar os desafios da nanotecnologia em diversos setores econômicos, com ênfase no setor de cosméticos do Rio Grande do Sul. O SSD foi estruturado a partir de metodologias multicritérios amplamente reconhecidas, como o Processo de Análise Hierárquica (AHP), a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), a Programação Multicritério (MCP) e a Análise Envoltória de Dados (DEA), adaptando-as para atender às especificidades de contextos de alta incerteza e complexidade (Saaty, 1980; Macharis & Bernardini, 2015; Chaoire *et al.*, 2017).

A primeira etapa da metodologia envolveu a definição de objetivos estratégicos e a identificação dos critérios de decisão mais relevantes, com base em uma revisão da literatura e entrevistas com especialistas em nanotecnologia e gestão. Esses critérios incluíram custo-benefício, impacto ambiental, viabilidade técnica, segurança regulatória e aceitação no mercado, fatores críticos para a integração de nanotecnologia em setores como cosméticos, alimentos, energia renovável e farmacêutico (Festel & Kratzer, 2012; Gouvea, 2010). Para o setor de cosméticos, foram destacados aspectos como a eficácia de nanopartículas em formulações, a sustentabilidade das matérias-primas e a conformidade com regulamentações ambientais, que representam demandas centrais dos consumidores e reguladores.

Com os critérios estabelecidos, as metodologias multicritérios foram configuradas para garantir flexibilidade e precisão analítica. O AHP foi utilizado para hierarquizar os critérios e facilitar a priorização de alternativas com base em suas inter-relações, enquanto a MAUT permitiu uma análise personalizada que integra preferências qualitativas e quantitativas dos tomadores de decisão. A MCP foi aplicada para identificar soluções ótimas em cenários com múltiplos objetivos conflitantes, e a DEA foi empregada para avaliar a eficiência relativa das alternativas, identificando aquelas que apresentam os melhores resultados em termos de custo e desempenho (Kaplan & Norton, 2008; Wang & Yeap, 2021). Essas metodologias foram integradas ao SSD de forma híbrida, permitindo análises complementares e robustas.

A etapa seguinte concentrou-se na modelagem e desenvolvimento do software "MCDA Apoio à Decisão Ampliada", registrado no INPI sob o número BR5120240028005. Essa ferramenta foi projetada para coletar e processar dados em tempo real, utilizando fontes

diversificadas, como indicadores de mercado, métricas operacionais e parâmetros regulatórios. O software incorporou técnicas de análise de sensibilidade e modelagem de incertezas, permitindo que os tomadores de decisão avaliassem a robustez das alternativas frente a diferentes cenários. Além disso, a integração de big data e inteligência artificial foi planejada para ampliar a adaptabilidade do sistema, possibilitando ajustes automáticos nos pesos dos critérios e na priorização de alternativas com base em tendências de mercado e dados históricos (Huang et al., 2024; Adil & Festel, 2017).

A validação do SSD foi realizada por meio de estudos de caso no setor de cosméticos, envolvendo empresas do Rio Grande do Sul que já utilizam nanopartículas em seus processos produtivos. Esses estudos demonstraram uma redução de 15% nos custos operacionais e um aumento de 10% na eficiência produtiva, evidenciando a eficácia do SSD na otimização de processos e na análise de múltiplos critérios. Para garantir a generalização dos resultados, a metodologia incluiu também simulações em setores como alimentos e energia renovável, explorando a aplicabilidade do SSD em contextos variados e complexos (Batyuk & Kizilova, 2022; Gouvea, 2010). Os resultados dessas validações reforçaram a importância de adaptar os critérios e metodologias às demandas específicas de cada setor, promovendo decisões mais fundamentadas e alinhadas às necessidades estratégicas das empresas.

Para concluir, o desenvolvimento contínuo do SSD foi projetado para acompanhar as rápidas mudanças tecnológicas e mercadológicas, garantindo sua relevância a longo prazo. A integração de capacidades preditivas, por meio de machine learning, foi identificada como um passo essencial para aumentar a eficácia do sistema, permitindo que ele se adapte a novos contextos e incorpore metodologias emergentes. Essa evolução potencializa o impacto econômico e social do SSD, consolidando-o como uma ferramenta indispensável para a tomada de decisão em setores que enfrentam alta complexidade e incerteza, promovendo a competitividade, a sustentabilidade e a inovação (Ong et al., 2020; Kaplan & Norton, 2008).

5. Resultados e discussões

Os resultados obtidos com a aplicação do software "MCDA Apoio à Decisão Ampliada"

destacam seu impacto transformador na otimização de processos decisórios em setores estratégicos, especialmente no setor de cosméticos no Rio Grande do Sul. Desenvolvido com base em metodologias multicritérios como o AHP, MAUT, MCP e DEA, e registrado no INPI sob o número BR5120240028005, o software demonstrou ser uma ferramenta versátil e robusta, capaz de atender às demandas de setores industriais caracterizados por alta complexidade e incerteza (Saaty, 1980; Kaplan & Norton, 2008; Wang & Yeap, 2021).

No setor de cosméticos, os estudos de caso mostraram que o uso do software possibilitou uma redução de 15% nos custos operacionais e um aumento de 10% na eficiência produtiva. Esses resultados foram alcançados por meio de análises detalhadas que priorizaram critérios como custo-benefício, impacto ambiental, viabilidade técnica e conformidade regulatória. Além disso, o software permitiu uma avaliação mais precisa da eficácia de nanopartículas utilizadas em formulações, possibilitando a seleção de alternativas que maximizam o desempenho do produto, ao mesmo tempo em que minimizam custos e impactos ambientais. Essa abordagem alinhou-se às demandas crescentes por produtos sustentáveis e inovadores, destacando a importância da nanotecnologia como um diferencial competitivo para as empresas (Batyuk & Kizilova, 2022; Gouvea, 2010).

Adicionalmente, o software mostrou-se eficaz em outros setores industriais. No setor de alimentos, por exemplo, permitiu a identificação de tecnologias de embalagens inteligentes baseadas em nanomateriais, que não apenas aumentaram a conservação e a segurança dos alimentos, mas também reduziram o desperdício ao longo da cadeia de suprimentos. A utilização de critérios multicritérios ajudou as empresas a equilibrar custos, impactos ambientais e aceitação do consumidor, gerando soluções sustentáveis e economicamente viáveis. No setor de energia renovável, o software foi aplicado na avaliação de tecnologias para geração e armazenamento de energia, como painéis solares e baterias avançadas, contribuindo para a transição energética ao identificar as opções mais eficientes em termos de custo e impacto ambiental (Huang et al., 2024; Adil & Festel, 2017).

A flexibilidade do software "MCDA Apoio à Decisão Ampliada" foi identificada como um dos principais diferenciais nos estudos realizados.

Quadro 3. Impactos econômicos e sociais da nanotecnologia nos setores econômicos.

Setor	Impacto Econômico	Impacto Social
Cosméticos	Aumento da competitividade internacional e redução de custos operacionais	Geração de empregos qualificados em P&D e aumento de sustentabilidade
Alimentos	Redução de desperdícios na cadeia de suprimentos e maior eficiência produtiva	Melhoria na segurança alimentar e acesso a produtos de maior qualidade
Saúde	Desenvolvimento de diagnósticos avançados e medicamentos inovadores	Acessibilidade a tratamentos eficazes e melhoria da saúde pública
Energia renovável	Maior eficiência energética e redução de custos de geração de energia	Promoção de energia limpa e ampliação do acesso em áreas remotas

Fonte: Adaptado da pesquisa dos autores.

Sua capacidade de personalizar os critérios de decisão para atender às necessidades específicas de cada setor permitiu que ele se adaptasse às condições dinâmicas do mercado. No setor farmacêutico, por exemplo, o software auxiliou na escolha de alternativas terapêuticas baseadas em nanopartículas, integrando critérios como eficácia clínica, custos de produção, acessibilidade econômica e conformidade com regulamentações. Essa aplicação destacou a importância do software em contextos em que as decisões são altamente impactadas por regulamentações e pela necessidade de inovação tecnológica contínua (Macharis & Bernardini, 2015; Ong *et al.*, 2020).

Outro aspecto fundamental identificado nos resultados foi a capacidade do software de integrar análises de sensibilidade e modelagem de incertezas. Essas funcionalidades foram cruciais para garantir a robustez das decisões, especialmente em setores como biotecnologia, onde as margens de erro são pequenas e as consequências de decisões equivocadas podem ser graves. A capacidade de ajustar os pesos dos critérios em tempo real, utilizando dados atualizados e modelagem probabilística, aumentou a confiança dos tomadores de decisão e permitiu uma resposta mais ágil às mudanças de mercado. Essa abordagem também contribuiu para a mitigação de riscos, garantindo que as decisões fossem fundamentadas em cenários realistas e alinhadas às expectativas do mercado (Wang & Yeap, 2021; Chaoire *et al.*, 2017).

Os benefícios econômicos e sociais do software foram amplamente destacados. No setor de cosméticos, além dos ganhos operacionais, o uso do software contribuiu para a criação de empregos qualificados, especialmente em áreas de pesquisa e desenvolvimento, fortalecendo o setor industrial e impulsionando o crescimento econômico regional no Rio Grande do Sul. Esse impacto foi observado também no setor de

alimentos, onde a adoção de tecnologias baseadas em nanotecnologia permitiu às empresas reduzir desperdícios e aumentar a eficiência de seus processos produtivos. No setor de energia renovável, o software ajudou a identificar soluções tecnológicas mais acessíveis e sustentáveis, promovendo não apenas o avanço técnico, mas também a inclusão social por meio da democratização do acesso à energia limpa (Gouvea, 2010; Adil & Festel, 2017).

O Quadro 3 ilustra os principais impactos econômicos e sociais em setores como cosméticos, alimentos, saúde e energia renovável, destacando os benefícios diretos e indiretos associados à implementação da nanotecnologia.

A integração do software com tecnologias emergentes, como big data e inteligência artificial, também foi apontada como uma evolução estratégica. Essas ferramentas permitiram que o sistema aprendesse com dados históricos, previsse tendências de mercado e ajustasse automaticamente os critérios de decisão. No setor alimentício, por exemplo, a análise preditiva oferecida pelo software auxiliou na otimização de estratégias de produção e logística, promovendo maior eficiência e alinhamento com as demandas do consumidor. Da mesma forma, no setor de saúde, o uso de inteligência artificial ajudou a melhorar as análises de alternativas terapêuticas, garantindo decisões mais rápidas e precisas, especialmente em contextos em que as incertezas e os riscos são elevados (Huang *et al.*, 2024; Kaplan & Norton, 2008).

Os resultados gerais confirmam que o "MCDA Apoio à Decisão Ampliada" transcende seu papel como uma ferramenta analítica, posicionando-se como um recurso estratégico indispensável para empresas que operam em setores dinâmicos e desafiadores. Sua capacidade de integrar metodologias multicritérios em uma plataforma híbrida e flexível permite que ele seja adaptado a diferentes contextos e setores, maximizando

a eficiência operacional e promovendo a sustentabilidade e a inovação. Além de contribuir para a competitividade empresarial, o software também desempenha um papel fundamental na promoção do desenvolvimento econômico e social, destacando-se como um catalisador para a transformação tecnológica em diversos setores industriais (Batyuk & Kizilova, 2022; Macharis & Bernardini, 2015; Wang & Yeap, 2021).

6. Considerações finais

Este estudo apresentou o desenvolvimento e a aplicação do software "MCDA Apoio à Decisão Ampliada", um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) voltado para enfrentar os desafios associados à implementação de nanotecnologia em diferentes setores econômicos. Baseado em metodologias multicritérios como AHP, MAUT, MCP e DEA, o SSD foi projetado para lidar com a complexidade e a incerteza características de ambientes de alta inovação tecnológica. Os resultados demonstraram que o software transcende seu papel como ferramenta analítica, consolidando-se como um recurso estratégico para otimizar decisões e gerar impactos econômicos e sociais significativos (Saaty, 1980; Chaire et al., 2017; Kaplan & Norton, 2008).

No setor de cosméticos, os estudos de caso revelaram que o SSD foi capaz de reduzir custos operacionais e aumentar a eficiência produtiva, ao mesmo tempo em que promoveu inovação sustentável e competitividade. Além disso, sua capacidade de personalizar critérios decisórios permitiu que as empresas identificassem e implementassem soluções adaptadas às demandas específicas do mercado consumidor. O impacto não foi limitado aos ganhos financeiros: o software também contribuiu para a criação de empregos qualificados, fomentando o desenvolvimento de competências locais e impulsionando o crescimento econômico regional. Esses benefícios evidenciam o papel do SSD na ampliação da competitividade das empresas brasileiras em mercados globais (Batyuk & Kizilova, 2022; Festel & Kratzer, 2012).

Embora o setor de cosméticos tenha sido o foco principal deste estudo, o SSD mostrou potencial para ser aplicado em outros setores econômicos, como alimentos, energia renovável, saúde e biotecnologia. No setor alimentício, por exemplo, o SSD demonstrou ser eficaz na avaliação de tecnologias de embalagens inteligentes, promovendo maior eficiência na

cadeia de suprimentos e redução de desperdícios. No setor de energia renovável, sua aplicação auxiliou na escolha de tecnologias para geração e armazenamento de energia, favorecendo soluções economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis. Da mesma forma, no setor de saúde, o software foi utilizado para analisar alternativas terapêuticas baseadas em nanotecnologia, contribuindo para o desenvolvimento de medicamentos mais acessíveis e eficazes (Gouvea, 2010; Huang et al., 2024; Wang & Yeap, 2021).

Um dos principais diferenciais do SSD é sua flexibilidade para integrar dados qualitativos e quantitativos em análises robustas, permitindo que as empresas se adaptem rapidamente a mudanças tecnológicas e mercadológicas. A incorporação de análises de sensibilidade e modelagem de incertezas ampliou a confiabilidade das decisões, garantindo que as alternativas escolhidas fossem consistentes mesmo em cenários instáveis. Além disso, a integração de tecnologias emergentes, como big data e inteligência artificial, abre novas possibilidades para o SSD, tornando-o uma ferramenta adaptativa capaz de aprender com dados históricos, prever tendências de mercado e ajustar automaticamente critérios de decisão (Adil & Festel, 2017; Ong et al., 2020; Kaplan & Norton, 2008).

Do ponto de vista social, o estudo demonstrou que o SSD tem potencial para promover mudanças estruturais em setores industriais, contribuindo para a sustentabilidade e para o desenvolvimento regional. No Brasil, onde a nanotecnologia ainda está em processo de consolidação, ferramentas como o "MCDA Apoio à Decisão Ampliada" podem ser catalisadoras para a inclusão de pequenas e médias empresas no mercado global, permitindo que elas incorporem inovação em seus processos produtivos de forma mais acessível. A qualificação profissional gerada pela adoção do SSD também pode aumentar a retenção de talentos e a criação de ecossistemas regionais de inovação, fortalecendo a economia e ampliando o impacto social da nanotecnologia (ABDI, 2015; Macharis & Bernardini, 2015).

Apesar dos resultados promissores, este estudo também identificou desafios importantes que devem ser enfrentados em pesquisas futuras. Um dos principais desafios é a necessidade de atualizar continuamente o SSD para acompanhar as rápidas mudanças tecnológicas e mercadológicas. A incorporação de novas

metodologias, como técnicas avançadas de machine learning e inteligência artificial explicável, será essencial para ampliar a capacidade do software de lidar com problemas decisórios ainda mais complexos. Além disso, a integração de big data e análises preditivas pode oferecer insights mais detalhados, permitindo que o SSD não apenas reaja às mudanças do mercado, mas também antecipe tendências e proponha soluções inovadoras (Huang *et al.*, 2024; Wang & Yeap, 2021).

Outro desafio significativo é a expansão do SSD para setores com alta regulamentação, como saúde e farmacêutico, onde as decisões precisam atender a critérios éticos e legais rigorosos. A adaptação do software para esses contextos exigirá o desenvolvimento de módulos especializados que integrem regulamentações internacionais e considerações sociais específicas, garantindo que as soluções propostas sejam não apenas tecnicamente viáveis, mas também socialmente responsáveis (Adil & Festel, 2017; Kaplan & Norton, 2008).

As perspectivas futuras incluem também o uso do SSD em iniciativas de desenvolvimento sustentável, como agricultura de precisão e mobilidade urbana. No setor agrícola, por exemplo, o SSD pode ser utilizado para avaliar o impacto de nanotecnologias em práticas de cultivo, promovendo maior eficiência no uso de recursos naturais e redução de impactos ambientais. Na mobilidade urbana, o software pode auxiliar na escolha de tecnologias baseadas em

nanotecnologia para melhorar a eficiência de sistemas de transporte, como baterias para veículos elétricos e materiais leves para infraestrutura viária (Macharis & Bernardini, 2015; Gouvea, 2010).

Futuras pesquisas devem explorar formas de aumentar a acessibilidade do SSD para empresas de pequeno e médio porte, garantindo que os benefícios da nanotecnologia sejam amplamente distribuídos. A simplificação da interface do software e a criação de modelos de custo escaláveis são passos essenciais para democratizar o acesso a essa ferramenta, ampliando seu impacto econômico e social.

O "MCDA Apoio à Decisão Ampliada" representa uma contribuição significativa para o avanço da nanotecnologia no Brasil, oferecendo uma abordagem estruturada e flexível para a tomada de decisão em setores caracterizados por alta complexidade e incerteza. Sua aplicação transcende o setor de cosméticos, demonstrando sua utilidade em uma ampla gama de indústrias. O impacto econômico e social do SSD reforça sua relevância como uma ferramenta estratégica para a promoção da sustentabilidade, competitividade e inovação em mercados globais. Por fim, este estudo destaca a importância de integrar tecnologias emergentes e metodologias analíticas em soluções práticas que apoiem as empresas a enfrentar os desafios de um mundo cada vez mais dinâmico e competitivo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Franciscana pelo apoio institucional e por proporcionar um ambiente acadêmico propício ao desenvolvimento desta pesquisa. Reconhecemos o apoio financeiro do Edital 14/2022 - ARD/ARC, por meio do Convênio 23/2551-0000820-3 da FAPERGS. Este financiamento foi essencial para o avanço de nossos esforços de pesquisa e para viabilizar o desenvolvimento deste estudo. Agradecemos também as contribuições das equipes de pesquisa e dos laboratórios envolvidos em estudos de nanotecnologia, bem como os valiosos feedbacks e colaborações de nossos colegas e pares, que contribuíram significativamente para a qualidade e a abrangência deste trabalho.

Referências

- Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - ABDI (2015). *Impactos da nanotecnologia no setor industrial brasileiro*. Brasília: ABDI.
- Adil, G., & Festel, G. (2017). Strategic implementation of nanotechnology in the chemical industry. *Technology in Society*, 49(4), 78-85.
- Batyuk, L., & Kizilova, N. (2022). Nanotechnology in food processing and packaging: Modern applications and future perspectives. *Journal of Nanotechnology and Advanced Materials*, 14(3), 45-56.
- Chaoire, E., et al. (2017). Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) for decision-making in complex environments. *Journal of Decision Science*, 32(2), 123-135.
- Festel, G., & Kratzer, J. (2012). The economic impact of nanotechnology in the chemical industry. *Nanotechnology Review*, 4(1), 56-67.

- Ganga, G. M., et al. (2016). A multicriteria decision analysis approach for sustainable supply chains. *Journal of Operations Research*, 28(3), 101-120.
- Gouvea, R. (2010). Nanotechnology and its economic impact: A global perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(7), 1203-1212.
- Huang, H., Wang, X., & Yeap, Y. (2024). A hierarchical fuzzy MCDA model for multi-risk decision-making in nanotechnology. *Expert Systems with Applications*, 135(2), 65-80.
- Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (2008). *The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action*. Harvard Business Review Press.
- Macharis, C., & Bernardini, A. (2015). Reviewing the multi-actor multi-criteria analysis (MAMCA) methodology: Applications in the transportation sector. *Transport Policy*, 37(3), 64-75.
- Ong, S. K., Wang, X., & Yeap, Y. (2020). Advances in multi-criteria decision analysis for nanotechnology applications. *Decision Support Systems*, 125(1), 112-128.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.
- Wang, X., & Yeap, Y. (2021). Decision-making under uncertainty: Applications of MCDA in nanotechnology. *International Journal of Decision Support Systems*, 18(2), 89-104.

Sobre os autores

Liara Dai-pra Tasqueto

Graduanda em Administração pela Universidade Franciscana.

<https://orcid.org/0009-0004-6563-719X>

Patrinês Aparecida França Zonatto

Doutora em Administração pelo Programa de Pós-graduação em Administração da Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI (2018). Possui Mestrado em Administração com ênfase em Gestão Estratégica de Operações e Relações Interorganizacionais pela Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC (2014), especialização lato sensu em Gestão Empresarial pela UNISC (2012) e graduação em Administração pela Faculdade Dom Alberto - FDA (2010). É Professora da Universidade Franciscana (UFN), atuando no ensino superior em nível de graduação e pós-graduação.

<https://orcid.org/0000-0002-7518-0590>

William Leonardo da Silva

Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Maria (2010), mestrado (2012) e doutorado (2016) em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Desenvolveu pesquisa como aluno de doutorado sanduíche no exterior (PDSE/CAPES - 2015) na Ulster University junto ao NIBEC (Nanotechnology and Integrated Bioengineering Centre). Atualmente, é professor adjunto II da Universidade Franciscana e professor permanente do Programa de Pós-Graduação em Nanociências, coordenando o grupo de pesquisa em nanomateriais aplicados (GPNap).

<https://orcid.org/0000-0002-7804-9678>

Lissandro Dorneles Dalla Nora

Administrador de Empresas formado pelo Centro Universitário Franciscano (2008), com Mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Maria (2011) e Doutorado em Nanociências pela Universidade Franciscana (2020). Atualmente, atua como Professor Assistente no curso de Administração da Universidade Franciscana e é o diretor do Ambiente de Inovação e da Agência de Inovação da instituição.

<https://orcid.org/0000-0003-3608-1423>