

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MARIA LUÍSA VEIRA MELLO DE OLIVEIRA CASTRO

**MODELO MULTICRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DAS
ROTAS TECNOLÓGICAS DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO
VERDE**

Área: Pesquisa Operacional

Novembro 2025

MARIA LUÍSA VIEIRA MELLO DE OLIVEIRA CASTRO

**MODELO MULTICRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DAS
ROTAS TECNOLÓGICAS DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO
VERDE**

Área: Pesquisa Operacional

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Produção da
Universidade Federal de Mato Grosso do
Sul.

Orientador: Profa. Dra. Carolina Lino
Martins Pompêo de Camargo

Novembro 2025

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeção da participação do hidrogênio de baixo carbono na demanda final de energia até 2050, em cenários de neutralidade climática. Adaptado de IRENA (2021) e FREITAS et al. (2023)12

Figura 2 – Esquema simplificado de rotas de produção de hidrogênio e classificação por intensidade de carbono (cinza, azul, verde, turquesa). Elaboração própria a partir de IRENA (2021)15

Figura 3 – Exemplo de inserção do hidrogênio verde em cadeias industriais brasileiras e potenciais rotas de exportação. Adaptado de EPE (2021) e FREITAS et al. (2023) ...16

Figura 4 – Fluxo simplificado de aplicação do método FITradeoff. Elaboração própria ...20

Figura 5 – Vista geral da usina experimental de hidrogênio verde ...24

Figura 6 – Vista geral da usina experimental de hidrogênio verde25

Figura 7 – Vista geral da usina experimental de hidrogênio verde25

Figura 9 – Matriz de decisão com os desempenhos originais das alternativas (A1–A7) em cada critério (C1–C5). Elaboração própria a partir de dados de engenharia, mercado e literatura ...38

Figura 10 – Custo individual, custo acumulado e ranking das alternativas de aplicação do hidrogênio verde43

Figura 11 – Fluxograma de ordenação das alternativas gerado pelo FITradeoff DSS44

Figura 12 – Intervalos admissíveis dos pesos dos critérios (C1–C5) no modelo FITradeoff45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rotas de aplicação do hidrogênio verde consideradas no estudo.....	28
Tabela 2 – Critérios de avaliação das alternativas de aplicação do hidrogênio verde.....	34
Tabela 3 – Panorama de comércio exterior das rotas de aplicação selecionadas (NCM, importações e exportações)...37	

RESUMO

O hidrogênio verde tem se consolidado como vetor estratégico para a descarbonização de setores industriais e energéticos de difícil abatimento, especialmente em países com elevada participação de fontes renováveis na matriz elétrica, como o Brasil. Neste contexto, este Trabalho tem como objetivo priorizar alternativas de aplicação do hidrogênio verde produzido em uma usina experimental instalada em uma universidade brasileira, tratando o problema como uma decisão multicritério sob restrição orçamentária. Para isso, foi desenvolvido um estudo de caso com abordagem quantitativa, no qual sete alternativas de aplicação são avaliadas em cinco critérios: viabilidade econômica (CAPEX específico), demanda de mercado potencial, viabilidade técnica (consumo específico de hidrogênio), redução de emissões e logística de armazenamento e transporte. Os dados foram obtidos a partir de estudos de engenharia da usina, bases de comércio exterior e literatura especializada, sendo consolidados em uma matriz de decisão alimentada no método FITradeoff, em sua variante custo-benefício. As preferências foram elicitadas junto ao diretor responsável pela usina experimental, considerado decisor do processo. Os resultados indicam que o portfólio ótimo para um orçamento de US\$ 5.000.000,00 é composto pelas alternativas metanol verde, eletricidade por células a combustível, amônia verde e aço verde, utilizando aproximadamente 81% dos recursos disponíveis. O estudo contribui ao demonstrar a aplicabilidade de modelos multicritério em problemas de planejamento energético em escala piloto, oferecendo um instrumento estruturado de apoio à decisão para a gestão de uma usina de hidrogênio verde.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde; Apoio Multicritério à Decisão; FITradeoff; Portfólio de Projetos; Planejamento Energético.

ABSTRACT

Green hydrogen has been consolidated as a strategic vector for the decarbonization of hard-to-abate industrial and energy sectors, especially in countries with a high share of renewable sources in the power mix, such as Brazil. In this context, this work aims to prioritize application alternatives for green hydrogen produced in an experimental plant installed at a Brazilian university, treating the problem as a multicriteria decision under budget constraint. To this end, a quantitative case study was developed, in which seven application alternatives are evaluated according to five criteria: economic feasibility (specific CAPEX), potential market demand, technical feasibility (specific hydrogen consumption), emissions reduction, and storage and transport logistics. The data were obtained from engineering studies of the plant, foreign trade databases and specialized literature, and were consolidated into a decision matrix fed into the FITradeoff method, in its cost–benefit variant. The preferences were elicited from the director responsible for the experimental plant, considered the decision maker in the process. The results indicate that the optimal portfolio for a budget of US\$ 5,000,000.00 is composed of the alternatives green methanol, electricity from fuel cells, green ammonia and green steel, using approximately 81% of the available resources. The study contributes by demonstrating the applicability of multicriteria models to energy planning problems at pilot scale, offering a structured decision-support tool for the management of a green hydrogen plant.

Keywords: Green Hydrogen; Multicriteria Decision Aid; FITradeoff; Project Portfolio; Energy Planning.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	7
1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 JUSTIFICATIVAS	9
1.2 OBJETIVOS	10
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
1.2 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E HIDROGÊNIO COMO VETOR ESTRATÉGICO	12
2.1 JUSTIFICATIVAS HIDROGÊNIO VERDE: CARACTERÍSTICAS, PRODUÇÃO E CLASSIFICAÇÃO.....	13
2.2.1 Definição e propriedades	14
2.2.2 Processos de produção e classificação por intensidade de carbono	15
2.2.3 Panorama global e brasileiro do hidrogênio verde	16
2.3 MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE APOIO Á DECISÃO E ABORTAGEM CUSTO-BENEFÍCIO .	18
2.3.1 Métodos multicritério de apoio à decisão (MCDA)	18
2.3.2 O modelo FITradeoff.....	19
2.3.2 Abordagem custo–benefício	21
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	24
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA USINA EXPERIMENTAL DE HIDROGÊNIO VERDE E DO DECISOR ...	24
3.2 Procedimentos metodológicos e fluxo do estudo	26
3.3 Identificação das alternativas de aplicação do hidrogênio verde	28
3.3.1 Amônia verde (A1)	29
3.3.2 Metanol verde (A2)	29
3.3.3 Aço verde (A3)	29
3.3.4 Combustível sustentável de aviação (A4)	30
3.3.5 Gás natural sintético – SNG (A5)	30
3.3.6 Eletricidade via células a combustível (A6)	30
3.3.7 Combustíveis para transporte marítimo (A7)	31
3.3.8 Síntese e implicações para o problema de decisão	31
3.4 Definição dos critérios e construção da matriz de decisão	33
3.4.1 Critérios de avaliação	33
3.4.2 Construção da matriz de decisão	36
3.5 Aplicação do método FITradeoff	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Resultados de custo individual, custo acumulado e ranking	43
4.2 Ordenação das alternativas — FITradeoff DSS	44
4.3 Intervalos admissíveis dos pesos (C1–C5)	45
4.4 Discussão dos resultados	46
5 CONCLUSÃO	48

5.1 Principais contribuições	48
5.2 Limitações do estudo	49
5.3 Recomendações para trabalhos futuros	49
<hr/>	
REFERÊNCIAS	50

1. INTRODUÇÃO

A dependência histórica de combustíveis fósseis sustentou o crescimento econômico e industrial nas últimas décadas, mas também intensificou as emissões de gases de efeito estufa e a pressão sobre os sistemas climáticos. Em resposta a esse cenário, a comunidade internacional estabeleceu acordos e metas de mitigação de longo prazo, como o Acordo de Paris, que busca limitar o aumento da temperatura média global por meio da redução das emissões (UNITED NATIONS, 1992). Nesse contexto de transição energética, cresce o interesse por vetores capazes de armazenar, transportar e utilizar energia de fontes renováveis de forma flexível e de baixo carbono.

Entre esses vetores, o hidrogênio verde, produzido via eletrólise da água alimentada por fontes renováveis, destaca-se como uma das alternativas mais promissoras. Projeções recentes indicam que esse vetor poderá suprir parcela relevante da demanda energética global, chegando a cerca de 10% do consumo mundial em 2050, com potencial de movimentar receitas superiores a dois trilhões de dólares por ano (FREITAS et al., 2023). Além de substituir combustíveis fósseis em setores difíceis de eletrificar, o hidrogênio verde pode atuar como elemento central em cadeias de valor associadas a fertilizantes, combustíveis sintéticos e insumos industriais.

O Brasil apresenta condições particularmente favoráveis para se inserir nesse mercado emergente, devido à disponibilidade de recursos naturais, à elevada participação de renováveis na matriz elétrica e ao potencial de expansão de fontes como solar e eólica. Diversos estudos apontam o acoplamento setorial (*sector coupling*) como estratégia para integrar sistemas elétricos, de transporte e industriais, permitindo o aproveitamento de excedentes de geração renovável, aumentando a flexibilidade do sistema e reduzindo emissões em múltiplos segmentos (VAN NUFFEL et al., 2018; IRENA, 2021; GIZ, 2021). No contexto brasileiro, análises de planejamento de longo prazo também ressaltam o potencial de uso do hidrogênio e de outras tecnologias de baixo carbono como elementos de integração entre setores e de suporte à descarbonização da matriz (EPE, 2022). Ainda assim, a forma como o hidrogênio verde será inicialmente incorporado à economia brasileira permanece em aberto, especialmente no que diz respeito às rotas tecnológicas e aos produtos derivados a serem priorizados em fases piloto.

Nesse cenário, a implantação de usinas experimentais de hidrogênio verde surge como passo intermediário entre a pesquisa acadêmica e a aplicação em escala industrial. A definição de quais rotas de aplicação devem compor o portfólio inicial de uma usina desse tipo, por exemplo, produção de amônia, metanol, aço verde ou combustíveis sustentáveis de aviação, exige equilibrar rentabilidade econômica, viabilidade técnica, impactos ambientais e questões logísticas. Nesse sentido, a questão central que orienta este trabalho pode ser formulada da seguinte maneira: diante de um orçamento de investimento limitado, quais rotas tecnológicas de aplicação do hidrogênio verde devem ser priorizadas em uma usina experimental, considerando simultaneamente critérios econômicos, técnicos, ambientais e logísticos? Trata-se, portanto, de um problema de decisão que envolve múltiplos critérios e incertezas, para o qual abordagens baseadas em um único indicador tendem a ser insuficientes.

Nesse contexto, métodos multicritério de apoio à decisão (MCDM/A) podem ser utilizados quando não é possível representar todos os objetivos, conflitantes entre si, em apenas um problema (DE ALMEIDA, 2013). Eles se apresentam como alternativa adequada para estruturar o problema, incorporar de forma explícita as preferências dos decisores e tornar o processo de priorização mais transparente (DE ALMEIDA, 2013).

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é propor um modelo multicritério para a avaliação de rotas tecnológicas de aplicação do hidrogênio verde para uma usina experimental, a partir da definição de um portfólio de projetos, equilibrando critérios econômicos, técnicos, ambientais e logísticos. Para tanto, foi utilizado o método FITradeoff (Flexible and Interactive Tradeoff method) para seleção de portfólio de projetos com base na razão custo-benefício (FREJ, EKEL & DE ALMEIDA, 2021).

Em particular, o método FITradeoff destaca-se por utilizar informações parciais e a redução da carga cognitiva na elicitação das preferências do decisor, ao exigir menos comparações diretas entre alternativas e permitir análises de robustez (de ALMEIDA *et al.*, 2016). Assim, a aplicação do FITradeoff a um conjunto de rotas de aplicação do hidrogênio verde em uma usina experimental contribui tanto para a prática gerencial, ao apoiar decisões de investimento em um contexto inovador, quanto para a literatura de MCDM/A em energia e sustentabilidade.

1.1 JUSTIFICATIVAS

A implantação de uma usina experimental de hidrogênio verde envolve decisões estratégicas já na etapa piloto, uma vez que a seleção das rotas tecnológicas iniciais condiciona o aprendizado técnico, a formação de parcerias e o posicionamento em cadeias

de valor futuras. Em um cenário de recursos limitados, torna-se necessário definir quais produtos derivados ou aplicações devem ser priorizados para maximizar o retorno econômico e o benefício socioambiental, sem comprometer a flexibilidade do projeto.

Essas decisões são, por natureza, multicritério: além da viabilidade econômica e da demanda de mercado, é preciso considerar aspectos como maturidade tecnológica, impactos ambientais, exigências regulatórias, infraestrutura logística e alinhamento com estratégias de desenvolvimento regional. Avaliações baseadas apenas em indicadores financeiros ou em análises isoladas tendem a ignorar essas interdependências e podem conduzir a escolhas menos robustas.

Diante disso, justifica-se o uso de métodos multicritério de apoio à decisão, que, conforme discutido por Almeida (2013), permitem estruturar o problema em termos de critérios explícitos, comparar alternativas de forma sistemática e tornar mais transparente o tratamento das preferências dos decisores. Nesse contexto, o método FITradeoff apresenta vantagens relevantes: reduz o esforço cognitivo associado à elição de preferências, evita a necessidade de definir previamente todos os pesos de forma precisa e oferece mecanismos para análise de sensibilidade e avaliação da robustez das recomendações (ALMEIDA; COSTA, 2023)

A relevância deste trabalho é dupla. Do ponto de vista acadêmico, ele contribui para a aplicação de MCDM/A em um tema emergente, o hidrogênio verde, e explora o uso do FITradeoff na priorização de rotas tecnológicas em um ambiente de inovação. Do ponto de vista prático, oferece um modelo estruturado que pode apoiar gestores públicos e privados na tomada de decisão sobre investimentos iniciais em usinas experimentais, reduzindo riscos e aumentando a transparência do processo.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo geral

Definir um portfólio inicial de rotas tecnológicas de aplicação do hidrogênio verde para uma usina experimental, equilibrando critérios econômicos, técnicos, ambientais e logísticos, com apoio de um modelo multicritério de decisão baseado no método FITradeoff.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar e descrever as principais rotas tecnológicas e produtos possíveis a partir do hidrogênio verde no contexto da usina experimental considerada.

2. Realizar uma aplicação numérica para validação do modelo proposto, considerando um orçamento de investimento pré-definido para a usina experimental.
3. Analisar os resultados obtidos, incluindo a seleção do portfólio de investimentos, e conduzir uma análise de sensibilidade para avaliar a robustez das recomendações frente a variações nos parâmetros e pesos dos critérios.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além desta introdução, o trabalho está organizado em quatro capítulos principais:

- i. Capítulo 2 – Fundamentação Teórica: apresenta os conceitos centrais relacionados ao hidrogênio verde, às tecnologias de produção e aplicação, e aos métodos de apoio multicritério à decisão, com ênfase no método FITradeoff.;
- ii. Capítulo 3 – Metodologia: descreve o delineamento da pesquisa, o procedimento de aplicação do FITradeoff ao problema estudado, a caracterização das alternativas e a definição dos critérios e parâmetros utilizados na modelagem;
- iii. Capítulo 4 – Resultados e Discussão: expõe a aplicação numérica do modelo, o ranking das alternativas, o portfólio recomendado e os principais achados, incluindo a análise de sensibilidade e a discussão de implicações gerenciais.;
- iv. Capítulo 5 – Conclusão: sintetiza as principais contribuições do estudo, limitações da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros e aplicações práticas relacionadas ao hidrogênio verde e à utilização de métodos multicritério em decisões de investimento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta os conceitos fundamentais relacionados ao hidrogênio verde, às suas principais rotas de aplicação e aos métodos multicritério de apoio à decisão utilizados em problemas de planejamento energético. Por fim, é detalhado o método FITradeoff, adotado como ferramenta central deste estudo.

1.2 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E HIDROGÊNIO COMO VETOR ESTRATÉGICO

A intensificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) decorrente do uso de combustíveis fósseis tem impulsionado uma agenda global de transição energética, orientada para a expansão de fontes renováveis e a descarbonização de setores intensivos em energia. A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e, posteriormente, o Acordo de Paris estabeleceram metas de limitação do aumento da temperatura média global e reforçaram a necessidade de reduzir drasticamente as emissões ao longo deste século (UNITED NATIONS, 1992; UNITED NATIONS, 2015).

Nesse contexto, o hidrogênio tem sido apontado como um vetor energético capaz de complementar a eletrificação em segmentos nos quais a substituição direta de combustíveis fósseis por eletricidade é tecnicamente difícil ou economicamente onerosa, como transporte pesado, aviação, siderurgia e indústria química. Entre as diferentes formas de produção, destaca-se o chamado hidrogênio verde, obtido por meio da eletrólise da água alimentada por fontes renováveis (solar, eólica ou hidráulica). Por não estar associado a emissões diretas de carbono durante sua produção, o hidrogênio verde é considerado uma alternativa alinhada às metas de neutralidade climática e à estratégia de descarbonização de longo prazo (IRENA, 2021).

Relatórios recentes da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indicam que os países que já possuem políticas específicas para o desenvolvimento da economia do hidrogênio respondem por cerca de 90 % do produto interno bruto (PIB) mundial, evidenciando que o tema está fortemente associado à competitividade industrial e à segurança energética.

Paralelamente, estudos prospectivos apontam que o hidrogênio de baixo carbono poderá responder por uma fração relevante da matriz energética global nas próximas décadas, tanto como insumo industrial quanto como combustível em setores de transporte e geração elétrica. Em cenários de neutralidade climática, o hidrogênio verde pode atender até cerca de 10 % da demanda energética mundial em 2050, movimentando receitas da ordem de trilhões de dólares anuais (FREITAS et al., 2023; IRENA, 2021).

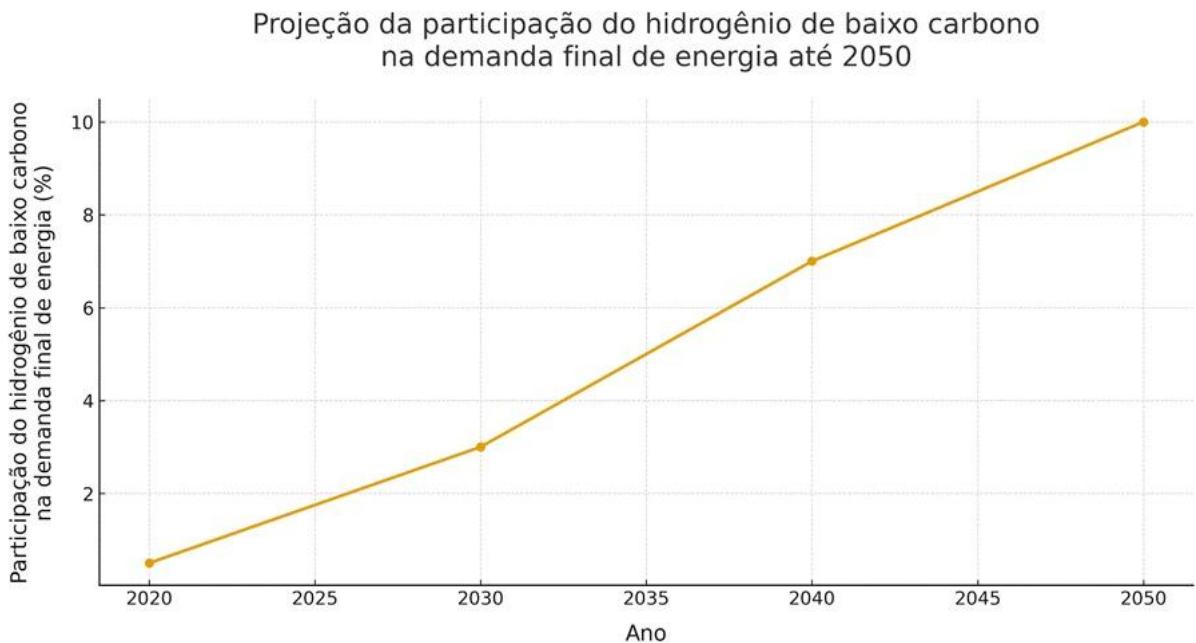


Figura 1 – Projeção da participação do hidrogênio de baixo carbono na demanda final de energia até 2050, em cenários de neutralidade climática. Adaptado de IRENA (2021) e FREITAS et al. (2023).

No caso brasileiro, o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2031) projeta que, em 2031, aproximadamente dois terços das emissões de carbono do setor energético estarão concentradas na indústria e no transporte, o que reforça a urgência de alternativas de baixo carbono para esses segmentos.

A elevada participação de fontes renováveis na matriz elétrica e o potencial de expansão de eólica e solar conferem ao país vantagens comparativas para a produção de hidrogênio verde, abrindo espaço para a formação de polos industriais e corredores de exportação. Iniciativas de usinas experimentais, como a planta estudada neste trabalho, contribuem para reduzir incertezas tecnológicas e de mercado, testar modelos de negócio e desenvolver competências locais ao longo da cadeia de valor do hidrogênio.

Por fim, a combinação entre pressão climática, oportunidades econômicas e necessidade de segurança energética torna o hidrogênio verde um dos pilares da transição energética em vários países. As seções seguintes detalham, primeiro, as características e rotas de produção do hidrogênio verde e, na sequência, as principais aplicações consideradas neste estudo, preparando o terreno para a modelagem multicritério do problema decisório.

2.1 JUSTIFICATIVAS HIDROGÊNIO VERDE: CARACTERÍSTICAS, PRODUÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

A implantação de uma usina experimental de hidrogênio verde envolve decisões estratégicas já na etapa piloto, uma vez que a seleção das rotas tecnológicas iniciais condiciona o aprendizado técnico, a formação de parcerias e o posicionamento em cadeias de valor futuras. Em um cenário de recursos limitados, torna-se necessário definir quais produtos derivados ou aplicações devem ser priorizados para maximizar o retorno econômico e o benefício socioambiental, sem comprometer a flexibilidade do projeto.

2.2.1 Definição e propriedades

O hidrogênio é o elemento mais abundante do universo e apresenta propriedades físico-químicas que o tornam particularmente interessante como vetor energético: elevada razão energia/massa, possibilidade de uso em combustão ou em células a combustível e compatibilidade com diferentes rotas de armazenamento e transporte (comprimido, liquefeito ou incorporado em portadores químicos). Do ponto de vista conceitual, hidrogênio verde é aquele produzido a partir de fontes renováveis, de forma que as emissões de gases de efeito estufa associadas ao seu ciclo de produção sejam desprezíveis ou muito inferiores às alternativas fósseis.

Na abordagem mais difundida, considera-se hidrogênio verde aquele obtido por eletrólise da água alimentada exclusivamente por eletricidade proveniente de fontes renováveis, como usinas solares fotovoltaicas, parques eólicos ou centrais hidrelétricas. Nessa rota, a água (H_2O) é dissociada em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) por meio de corrente elétrica, convertendo energia elétrica em energia química armazenada no hidrogênio. Quando a eletricidade é de origem renovável, não há emissões diretas de dióxido de carbono na etapa de produção, o que torna essa rota compatível com metas de neutralidade climática (IRENA, 2021).

Além do aspecto ambiental, o hidrogênio verde pode ser integrado a cadeias de valor já existentes (como fertilizantes, siderurgia e combustíveis para transporte), ou empregado diretamente em células a combustível estacionárias e veiculares, o que reforça seu papel como vetor de acoplamento setorial entre eletricidade renovável, indústria e transportes. Essas características explicam o crescente interesse em projetos piloto e plantas demonstrativas, como a usina experimental considerada neste trabalho.

2.2.2 Processos de produção e classificação por intensidade de carbono

A produção de hidrogênio pode ocorrer por diferentes rotas tecnológicas, que variam quanto às matérias-primas empregadas, ao grau de maturidade tecnológica e às emissões associadas. Por conveniência didática, parte da literatura adota uma classificação por “cores” (por exemplo, hidrogênios cinza, azul e verde) para indicar, de forma qualitativa, as diferenças de processo, fonte de energia e intensidade de carbono ao longo da cadeia de produção (ARCOS et al., 2023).

- i. Hidrogênio cinza – produzido principalmente por reforma a vapor de gás natural ou gasificação de combustíveis fósseis, sem captura de CO₂. Trata-se hoje da forma dominante de produção mundial, associada a emissões significativas de gases de efeito estufa;
- ii. Hidrogênio azul – também obtido a partir de combustíveis fósseis (em geral gás natural), porém acoplado a sistemas de captura e armazenamento de carbono (CCS). As emissões não são eliminadas, mas podem ser substancialmente reduzidas em comparação ao hidrogênio cinza, dependendo da eficiência do sistema de captura.;
- iii. Hidrogênio verde – produzido, sobretudo, por eletrólise da água alimentada por eletricidade renovável, sem o uso de combustíveis fósseis na etapa de conversão energética. É a rota de interesse deste estudo, por apresentar potencial de emissões próximas de zero ao longo da cadeia de produção, condicionada à matriz elétrica utilizada;
- iv. Hidrogênio turquesa – obtido por pirólise do gás natural, processo em que o metano é decomposto em hidrogênio e carbono sólido. A pegada de carbono dessa rota depende do destino dado ao subproduto sólido e da fonte de energia utilizada no reator.

Do ponto de vista energético, a rota de eletrólise da água pode ser implementada com diferentes tecnologias de eletrolisadores, como os alcalinos, de membrana de troca de prótons (PEM) e de óxido sólido, que se distinguem por eficiência, custo, dinâmica de operação e requisitos de pureza da água e dos gases. Em condições comerciais típicas, a eletrólise de baixa temperatura apresenta consumo específico de eletricidade da ordem de 50–60 kWh por quilograma de hidrogênio produzido, enquanto configurações de alta temperatura podem reduzir esse valor, o que torna o custo do hidrogênio fortemente dependente do preço da eletricidade renovável e do regime de operação dos eletrolisadores (FRANCO; GIOVANNINI, 2023). Dessa forma, a viabilidade econômica da produção de

hidrogênio verde está diretamente relacionada à disponibilidade de recursos renováveis de baixo custo e à integração adequada entre geração elétrica e operação dos eletrolisadores.

Rotas de produção e classificação por 'cores' do hidrogênio

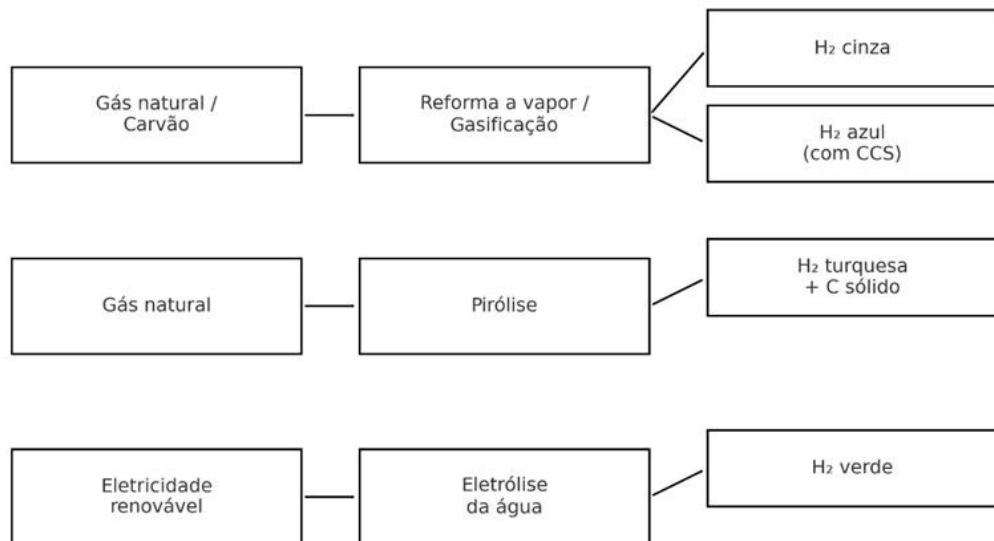


Figura 2 – Esquema simplificado de rotas de produção de hidrogênio e classificação por intensidade de carbono (cinza, azul, verde, turquesa). Elaboração própria a partir de IRENA (2021).

2.2.3 Panorama global e brasileiro do hidrogênio verde

No cenário internacional, diversos países e blocos econômicos têm incluído o hidrogênio de baixo carbono em suas estratégias de longo prazo para descarbonização, seja por meio de roteiros nacionais, programas de incentivos ou metas de incorporação de combustíveis alternativos em setores específicos. Estudos conduzidos por organismos como a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) e a Agência Internacional de Energia (IEA) indicam que o hidrogênio poderá desempenhar papel relevante em setores de difícil abatimento de emissões, como siderurgia, refino, transporte marítimo e aviação, complementando a eletrificação direta (IRENA, 2021).

Relatórios da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) mostram que o grupo de países com políticas ou iniciativas estruturadas para o hidrogênio já responde por aproximadamente 90 % do PIB global, reforçando que a economia do hidrogênio está associada não apenas à agenda climática, mas também à competitividade industrial e à segurança energética. Nesse contexto, vários países têm anunciado corredores de exportação de moléculas derivadas de

hidrogênio (como amônia, metanol e combustíveis sintéticos) e firmando parcerias bilaterais para desenvolvimento tecnológico e comercial.

No caso brasileiro, a combinação de matriz elétrica predominantemente renovável, potencial de expansão de fontes solar e eólica e disponibilidade de recursos naturais coloca o país em posição favorável para a produção de hidrogênio verde em escala. Documentos oficiais, como o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2031) e o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂), reconhecem explicitamente o hidrogênio como tecnologia estratégica para a transição energética, indicando ações de pesquisa, desenvolvimento e demonstração, bem como estudos para normatização e redução de barreiras regulatórias (EPE, 2021).

Nesse contexto, usinas experimentais e plantas piloto, como a instalação analisada neste trabalho, cumprem papel essencial ao permitir testar arranjos tecnológicos, caracterizar desempenhos e custos em condições reais de operação e explorar possíveis rotas de aplicação do hidrogênio produzido. As evidências geradas por esses projetos subsidiam tanto políticas públicas quanto decisões privadas de investimento, além de fornecer insumos empíricos para estudos de apoio multicritério à decisão, como o desenvolvido neste TCC.

Inserção do hidrogênio verde em cadeias industriais e rotas de exportação

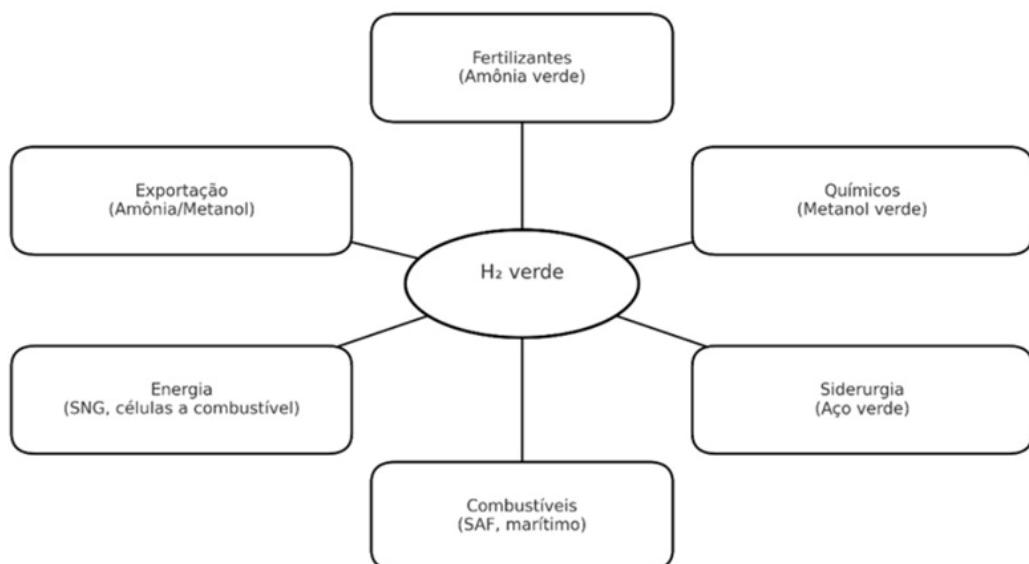


Figura 3 – Exemplo de inserção do hidrogênio verde em cadeias industriais brasileiras e potenciais rotas de exportação. Adaptado de EPE (2021) e FREITAS et al. (2023).

2.3 MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO E ABORTAGEM CUSTO-BENEFÍCIO

Os problemas analisados neste trabalho envolvem a escolha de rotas de aplicação do hidrogênio verde em um contexto em que múltiplas dimensões de desempenho devem ser consideradas simultaneamente: custos de investimento, potencial de mercado, requisitos técnicos, impactos ambientais e aspectos logísticos. Em situações desse tipo, a utilização de um único indicador agregado – por exemplo, apenas o custo de investimento ou apenas a redução de emissões – tende a ser insuficiente para captar os *trade-offs* relevantes entre alternativas.

Os métodos multicritério de apoio à decisão (MCDA) oferecem uma estrutura formal para lidar com a complexidade de problemas em que múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes, precisam ser considerados simultaneamente. Em linhas gerais, um processo de MCDA permite explicitar o conjunto de alternativas em análise, definir um conjunto de critérios que representem os objetivos em jogo, quantificar o desempenho de cada alternativa em cada critério, modelar as preferências do(s) decisor(es) em relação aos critérios (como importâncias relativas, compensações e limiares) e, por fim, sintetizar essas informações em recomendações de apoio, tais como rankings, classificações, escolhas ou portfólios de alternativas (adaptado de MARSH et al., 2016).

2.3.1 Métodos multicritério de apoio à decisão (MCDA)

A literatura de análise de decisões multicritério descreve diferentes famílias de métodos, que se distinguem pelo tipo de modelo de preferência adotado e pela forma como as recomendações são apresentadas ao decisor (BELTON; STEWART, 2002). Entre as famílias mais citadas, destacam-se:

- **Métodos de sobreclassificação (ou outranking)**, como as famílias ELECTRE e PROMETHEE, que constroem relações de dominância parcial entre alternativas a partir de comparações par a par, incorporando limiares de indiferença, preferência e, em alguns casos, voto.
- **Métodos baseados em funções de valor ou utilidade**, como a MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) e os métodos aditivos de valor. Nessa família, procura-se construir uma função de valor global para cada alternativa, a partir de funções de valor parciais associadas

a cada critério j e de constantes de escala (ou pesos) que refletem a importância relativa dos critérios.

- **Métodos de hierarquização por comparações par a par**, como o AHP (Analytic Hierarchy Process), nos quais o decisor expressa julgamentos de preferência entre pares de critérios e/ou alternativas, e esses julgamentos são sintetizados em vetores de prioridades. Em conjunto, essas famílias de métodos fornecem uma estrutura formal para organizar alternativas, critérios, desempenhos e preferências, permitindo gerar recomendações como rankings, classificações, seleções ou portfólios de alternativas (BELTON; STEWART, 2002).

Apesar das diferenças, há alguns elementos comuns: (i) a necessidade de representar o problema em uma matriz de decisão, na qual as linhas correspondem às alternativas e as colunas aos critérios; (ii) a definição de um modelo de preferência, que organiza como os desempenhos em cada critério é agregado; e (iii) a incorporação explícita das preferências do decisor no processo.

Neste trabalho, adota-se um modelo de agregação aditivo, em que o valor global de cada alternativa é calculado, de forma simplificada, como:

$$V(a) = \sum_{j=1}^m k_j v_j(a), \quad (3.1)$$

Em que k_j são as constantes de escala (associadas à importância relativa do j) e $v_j(a)$ é o valor normalizado do desempenho da alternativa aaa no critério j. Esse tipo de modelo é amplamente discutido na literatura de MCDA e serve como base para o método FITradeoff utilizado neste estudo.

2.3.2 O modelo FITradeoff

O FITradeoff (Flexible and Interactive Tradeoff) é um método de decisão multicritério desenvolvido no âmbito da Multi-Attribute Value Theory (MAVT) para problemas modelados por funções de valor aditivas. Seu principal objetivo é reduzir o esforço

cognitivo associado ao procedimento clássico de tradeoff, preservando, ao mesmo tempo, a fundamentação axiomática do modelo, por meio da utilização de informação parcial sobre as preferências do decisor em um processo interativo e flexível (DE ALMEIDA et al., 2016; MENDES et al., 2020). Em termos gerais, o método parte de um conjunto de alternativas e de uma matriz de consequências, na qual os desempenhos de cada alternativa em cada critério são expressos em uma escala de valor comum. Em seguida, o decisor é convidado a comparar cenários de compromisso construídos pelo método, correspondentes a combinações específicas de níveis de desempenho em dois ou mais critérios. Cada julgamento do decisor (por exemplo, “o cenário A é estritamente preferível a B” ou “sou indiferente entre A e B”) é traduzido em restrições lineares sobre as constantes de escala do modelo aditivo e, à medida que novas respostas são fornecidas, o conjunto de vetores de pesos admissíveis vai sendo progressivamente restringido, delimitando uma região viável de preferências. A partir dessa região viável, o sistema de apoio à decisão FITradeoff (FITradeoff DSS) permite verificar a potencial optimalidade das alternativas, identificar alternativas dominadas e gerar recomendações para diferentes problemáticas de decisão, como escolha, ordenação, classificação e seleção de portfólio (DE ALMEIDA et al., 2016; MARQUES; FREJ; DE ALMEIDA, 2022).

Uma característica importante é que, em cada iteração, o método escolhe a pergunta de forma a maximizar a informação obtida com o menor esforço do decisor, evitando perguntas muito difíceis ou pouco relevantes. Além disso, a abordagem permite realizar análises de robustez, verificando, por exemplo, se a alternativa melhor classificada permanece como tal em toda a região viável de pesos ou se há cenários em que outra alternativa passa a ser preferível.

Neste trabalho, as preferências são fornecidas por um único decisor, responsável por representar a visão institucional da usina estudada: um diretor de uma Universidade Brasileira, docente com formação em engenharia e atuação em projetos de pesquisa e inovação na área de hidrogênio. Ao longo do processo de aplicação do FITradeoff, esse decisor interagiu com o sistema para responder às comparações propostas e validar a estrutura de critérios, de modo a refletir prioridades compatíveis com o contexto da usina experimental.

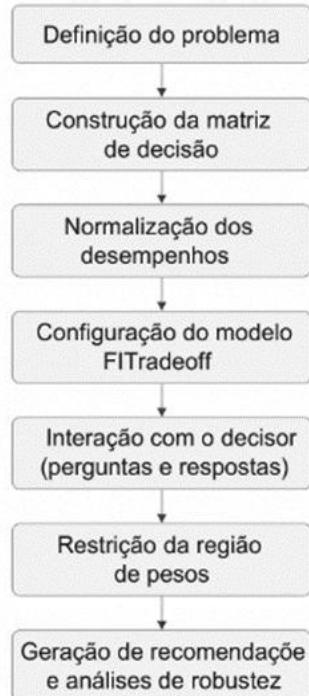


Figura 4 – Fluxo simplificado de aplicação do método FITradeoff. Elaboração própria.

2.3.2 Abordagem custo–benefício

Neste trabalho, as preferências são fornecidas por um único decisor, responsável por representar a visão institucional da usina estudada: um diretor de uma Universidade Brasileira, docente com formação em engenharia e atuação em projetos de pesquisa e inovação na área de hidrogênio. Ao longo do processo de aplicação do FITradeoff, esse decisor interagiu com o sistema para responder às comparações propostas e validar a estrutura de critérios, de modo a refletir prioridades compatíveis com o contexto da usina experimental.

Embora muitos problemas multicritério envolvam apenas a seleção de uma alternativa (por exemplo, escolher a melhor localização para uma planta), o presente estudo se caracteriza como um problema de portfólio: busca-se selecionar um conjunto de rotas de aplicação do hidrogênio verde que será implementado a partir de uma usina experimental, respeitando-se um orçamento máximo disponível para investimentos adicionais.

Nesse tipo de problema, cada alternativa a está associada a:

- Um custo $c(a)$, que representa o montante de recursos necessários para implementar a rota (investimento em equipamentos, adaptações de infraestrutura, etc.);

- Um benefício multicritério $V(a)$, obtido a partir da função de valor agregada do modelo FITradeoff, que incorpora as dimensões econômica, técnica, ambiental e logística definidas nos critérios.

A questão central passa a ser, então, quais alternativas incluir no portfólio P de forma a maximizar o benefício agregado sob a restrição de orçamento:

$$\max_P \sum_{a \in P} V(a) \quad \text{sujeito a} \quad \sum_{a \in P} c(a) \leq B, \quad (3.2)$$

em que B é o orçamento total disponível. Essa formulação é análoga a um problema de mochila (knapsack), mas aqui o valor de cada alternativa é calculado com base em uma função multicritério resultante da elicição das preferências do decisor.

A literatura recente sobre FITradeoff propôs uma variante específica para esse tipo de problema, denominada FITradeoff aplicado à problemática de seleção de portfólio com abordagem custo–benefício (B/C)". Nessa abordagem, o método:

1. Utiliza o procedimento interativo do FITradeoff para determinar uma região viável para as constantes de escala dos critérios, obtendo assim medidas de benefício $V(a)$ para cada alternativa.
2. Formula o problema de seleção de portfólio como um modelo de otimização, em que se busca maximizar o benefício multicritério total sujeito à restrição de orçamento.
3. Explora técnicas de análise de razão benefício–custo, bem como rotinas de busca no espaço de soluções, para identificar portfólios eficientes em termos de benefício obtido por unidade de recurso investido.
4. Permite realizar análises de sensibilidade, verificando, por exemplo, como o portfólio ótimo se altera quando o orçamento B é modificado ou quando há variações nos custos e desempenhos das alternativas.

A adoção do método FITradeoff na problemática de seleção de portfólio é particularmente adequada ao contexto deste trabalho por três razões principais:

- O problema real da usina envolve recursos financeiros limitados, que não permitem implementar simultaneamente todas as rotas de aplicação analisadas;
- Há interesse explícito em comparar o benefício obtido por unidade de investimento em cada rota, evitando decisões baseadas apenas em custos absolutos ou apenas em benefícios ambientais/tecnológicos;
- O método mantém a coerência com o modelo MCDA adotado, uma vez que utiliza a mesma estrutura de critérios e as mesmas preferências elicitadas com o decisior no FITradeoff “clássico”.

Assim, o capítulo metodológico (Capítulo 3) detalhará como o problema foi estruturado como decisão multicritério sob restrição orçamentária, como foram definidos os critérios e medidos os desempenhos das rotas de aplicação, e de que forma o modelo de seleção de portfólio com FITradeoff foram operacionalizados no estudo de caso.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo descreve o delineamento metodológico adotado para priorizar as rotas de aplicação do hidrogênio verde produzidas em uma usina experimental instalada em uma Universidade Brasileira. A pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem quantitativa, e estrutura-se como um problema de decisão multicritério sob restrição orçamentária, tratado por meio do método FITradeoff na sua variante de análise de portfólio com abordagem benefício–custo.

O capítulo está organizado em seções que apresentam: (i) a caracterização da usina experimental e do decisor envolvido; (ii) os procedimentos metodológicos e o fluxo em fases do estudo; (iii) a identificação das alternativas de aplicação do hidrogênio verde; (iv) a definição dos critérios de avaliação e a construção da matriz de decisão; (v) a aplicação do FITradeoff aplicado à problemática de seleção de portfólio com abordagem benefício–custo (B/C); e (vi) o tratamento dos dados e as principais hipóteses adotadas.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA USINA EXPERIMENTAL DE HIDROGÊNIO VERDE E DO DECISOR

A aplicação do modelo multicritério é realizada em uma usina experimental de hidrogênio instalada em uma Universidade Brasileira. Trata-se de uma instalação piloto dedicada à pesquisa e demonstração tecnológica, que combina eletrólise da água alimentada por energia elétrica, sistema de compressão e armazenamento e linhas de utilização do hidrogênio produzido.

O sistema é composto por um eletrolisador alcalino de 100 kW, com capacidade nominal de produção de aproximadamente 20 Nm³/h de hidrogênio, operando em regime contínuo (24 horas por dia, 7 dias por semana) e com flexibilidade operacional entre 50 % e 100 % da carga. O projeto conta com alimentação elétrica em 380 V / 60 Hz e suprimento de água doce para a etapa de eletrólise, além de equipamentos auxiliares de condicionamento, instrumentação e segurança.

Essa configuração caracteriza uma planta piloto, destinada principalmente à demonstração tecnológica, à realização de testes operacionais e ao estudo de diferentes cadeias de valor para o hidrogênio verde. A capacidade relativamente reduzida, típica de usinas experimentais, torna particularmente relevante a escolha criteriosa das rotas de aplicação a serem priorizadas, dado que o hidrogênio produzido precisa ser direcionado a usos que

combinem atratividade econômica, viabilidade técnica e benefícios socioambientais no contexto institucional da universidade.

O decisor neste estudo é o diretor responsável pela usina experimental, um docente da UFMS com formação em engenharia e experiência em projetos de pesquisa e inovação na área de hidrogênio. Esse decisor exerce papel central no processo de apoio multicritério: além de conhecer em detalhe as características técnicas da instalação, possui visão estratégica sobre as rotas de aplicação mais alinhadas às vocações regionais e aos objetivos de médio prazo da usina. Durante a aplicação do método FITradeoff, foi esse diretor quem forneceu os julgamentos de preferência entre cenários, validou a estrutura de critérios e indicou os limites orçamentários e de capacidade considerados nas simulações de portfólio. Para contextualizar a infraestrutura analisada e reforçar o caráter aplicado do estudo, foram inseridas três fotografias da usina experimental de hidrogênio verde (Figuras 5, 6 e 7), ilustrando a infraestrutura descrita nesta subseção:



Figura 5 – Vista geral da usina experimental de hidrogênio verde.



Figura 6 – Vista geral da usina experimental de hidrogênio verde.



Figura 7 – Vista geral da usina experimental de hidrogênio verde.

Essas imagens ilustram a infraestrutura existente e reforçam a relevância prática do problema de decisão tratado nos capítulos seguintes, ao mostrar que as alternativas de aplicação do hidrogênio verde não são apenas hipotéticas, mas dizem respeito ao aproveitamento efetivo da produção de uma planta em operação.

3.2 Procedimentos metodológicos e fluxo do estudo

A condução deste trabalho foi organizada em quatro fases principais, que estruturaram o caminho desde a caracterização do problema até a análise dos resultados do modelo multicritério. Essa organização em fases tem o objetivo de tornar o processo mais transparente, facilitando a replicação do estudo e a compreensão do papel de cada etapa na construção das recomendações.

De forma sintética, as fases são:

- Fase 1 – Caracterização do contexto e da usina experimental
Nesta fase foram reunidas e sistematizadas as informações sobre a usina de hidrogênio verde da UFMS, incluindo capacidade de produção, configuração tecnológica, condições operacionais e possíveis rotas de utilização do hidrogênio. Também foram consolidados os dados constantes no documento “Visão Geral” da usina e em relatórios técnicos internos, além de realizada a definição formal do decisôr responsável pelo processo – o diretor da usina experimental, docente da UFMS com experiência em engenharia e atuação em projetos de hidrogênio. Essa etapa permitiu delimitar o escopo do problema e identificar, em nível conceitual, as rotas de aplicação a serem consideradas como alternativas.
- Fase 2 – Estruturação do modelo multicritério (alternativas, critérios e matriz de decisão)
Na segunda fase, procedeu-se à definição detalhada das alternativas (rotas de aplicação A1–A7) e dos critérios de avaliação utilizados no modelo (C1–C5), com base na revisão de literatura, em dados de mercado e nas contribuições do decisôr e de especialistas envolvidos no projeto da usina. As alternativas foram descritas conceitualmente a partir das rotas tecnológicas apresentadas no Capítulo 2, enquanto os critérios foram operacionalizados em termos de indicadores mensuráveis, como CAPEX específico, demanda de mercado estimada, consumo específico de hidrogênio, redução de emissões e facilidade logística. Em seguida, foi construída a matriz de decisão, incorporando dados provenientes: de estudos de engenharia e simulações de processo fornecidos pela

equipe técnica; de dados de comércio exterior (por exemplo, Comex Stat) para representar a demanda de mercado potencial; e de estimativas específicas obtidas a partir da literatura e de planilhas de cálculo (como a tabela de importações e características setoriais utilizada neste estudo).

- Fase 3 – Aplicação do método FITradeoff e formulação do problema de portfólio
A terceira fase consistiu na aplicação do método FITradeoff ao conjunto de alternativas e critérios definidos. Inicialmente, os desempenhos foram normalizados em uma escala comum, garantindo comparabilidade entre critérios de natureza distinta. Em seguida, o problema foi configurado no sistema de apoio à decisão (DSS FITradeoff), e o decisor interagiu com o método por meio de comparações de cenários de compromisso, fornecendo julgamentos de preferência que foram traduzidos em restrições sobre as constantes de escala dos critérios. A partir dessa elicitação parcial, o modelo foi estendido para a abordagem benefício–custo (B/C), em que o problema é tratado como seleção de portfólio sob restrição orçamentária. Cada alternativa passou a ser representada por um par, em que $(c(a))$ é o custo de implementação da rota e $(V(a))$ é o valor multicritério agregado, e o modelo foi parametrizado com um orçamento máximo definido em conjunto com o decisor, compatível com a capacidade de investimento da usina experimental.
- Fase 4 – Definição dos custos, hipóteses de modelagem e análise de robustez
Nesta fase final foram definidos os custos e premissas de modelagem das alternativas, tratada a base de dados da matriz de decisão e conduzidas análises preliminares de sensibilidade e robustez. A partir dos valores de investimento estimados, estabeleceu-se um orçamento máximo para o portfólio e consolidaram-se hipóteses de mercado e tecnológicas compatíveis com a escala piloto. Além disso, foram realizadas variações paramétricas de custos e desempenhos e avaliados os impactos de alterações no orçamento disponível e nas constantes de escala dos critérios, de modo a verificar a estabilidade das recomendações. Os resultados detalhados dessas análises encontram-se no Capítulo 4.

O detalhamento operacional de cada etapa é apresentado nas seções seguintes: a seção 3.3 descreve as alternativas de aplicação consideradas; a seção 3.4 apresenta os critérios e a matriz de decisão; a seção 3.5 aborda a aplicação do FITradeoff aplicado à problemática de seleção de portfólio com abordagem benefício–custo (B/C), e a seção 3.6 discute o tratamento dos dados e as principais hipóteses utilizadas.

3.3 Identificação das alternativas de aplicação do hidrogênio verde

As propriedades do hidrogênio verde permitem sua inserção em diferentes cadeias de valor industriais e energéticas, seja como reagente químico, agente redutor ou combustível. Neste trabalho, foram selecionadas sete rotas de aplicação que representam setores estratégicos para a descarbonização e que dialogam com o contexto brasileiro de demanda e infraestrutura. Cada rota corresponde a uma alternativa (A1–A7) no modelo de decisão desenvolvido nos capítulos seguintes.

Tabela 1 – Rotas de aplicação do hidrogênio verde consideradas no estudo

Alternativa	Denominação da rota	Setor principal	Produto associado
A1	Amônia verde	Fertilizantes / Químico	Amônia (NH_3)
A2	Metanol verde	Químico / Combustíveis	Metanol (CH_3OH)
A3	Aço verde	Siderúrgico	Ferro-gusa / aço
A4	Querosene sustentável de aviação (SAF)	Aviação	Combustível sustentável de aviação (SAF)
A5	Gás natural sintético (SNG ou e-methane)	Gás / Energia	Gás sintético (rico em metano)
A6	Eletricidade via células combustível	Energia elétrica (distribuída / piloto)	Eletricidade
A7	Combustíveis para transporte marítimo	Transporte marítimo	Combustíveis de baixo carbono para navios

Fonte: Elaboração própria.

A seguir, detalham-se brevemente as sete rotas de aplicação escolhidas.

3.3.1 Amônia verde (A1)

A amônia é hoje um dos principais destinos do hidrogênio de origem fóssil, sobretudo na produção de fertilizantes nitrogenados. Na rota de amônia verde, o hidrogênio renovável é utilizado na síntese de NH_3 em substituição ao hidrogênio fóssil, mantendo-se a mesma

cadeia industrial, porém com menor intensidade de carbono. Essa rota é particularmente relevante para países com grande setor agroindustrial, pois permite reduzir a dependência de importação de fertilizantes e, ao mesmo tempo, diminuir a pegada de carbono associada à produção agrícola.

Além do uso tradicional em fertilizantes, a amônia verde tem sido estudada como portadora de hidrogênio e como possível combustível em motores de combustão adaptados e em turbinas, inclusive no transporte marítimo. Seu alto conteúdo de hidrogênio por unidade de volume e o fato de já existir infraestrutura logística consolidada para armazenagem e transporte de amônia a tornam uma candidata importante em cenários de exportação de hidrogênio verde.

3.3.2 Metanol verde (A2)

O metanol é um insumo químico versátil, empregado na produção de solventes, resinas, plásticos e combustíveis. Na rota de metanol verde, o hidrogênio renovável é combinado com dióxido de carbono capturado (de fontes concentradas ou da atmosfera) para sintetizar CH₃OH com baixa pegada de carbono. Essa rota permite, simultaneamente, valorizar CO₂ e produzir um combustível líquido de fácil manuseio, que pode ser armazenado e transportado em condições menos exigentes que o hidrogênio puro.

Do ponto de vista energético, o metanol verde tem sido considerado para uso em motores marítimos, em misturas com combustíveis fósseis ou como substituto direto, e também como insumo para a produção de combustíveis sintéticos de aviação. Em alguns cenários, portos e zonas industriais costeiras são apontados como potenciais polos de produção e consumo de metanol verde, articulando cadeias de exportação de produtos químicos e energéticos derivados do hidrogênio.

3.3.3 Aço verde (A3)

A indústria siderúrgica é responsável por parcela significativa das emissões globais de CO₂ devido ao uso intensivo de coque e carvão mineral no processo de redução do minério de ferro. A rota de aço verde propõe substituir parcial ou totalmente o carvão por hidrogênio na etapa de redução, via tecnologias como *direct reduced iron* (DRI) alimentadas por H₂. Nessa configuração, o hidrogênio atua como agente redutor, gerando vapor d'água em lugar de dióxido de carbono.

Embora a adoção em larga escala ainda enfrente desafios de custo e infraestrutura, o aço verde é considerado uma rota crítica para a descarbonização de setores de difícil abatimento, sobretudo em países com parque siderúrgico relevante. Para o contexto deste estudo, a alternativa A3 representa cadeias industriais em que o hidrogênio verde é utilizado como

insumo em processos metalúrgicos, reduzindo emissões sem alterar radicalmente o produto final entregue ao mercado.

3.3.4 Combustível sustentável de aviação (A4)

O setor de aviação comercial figura entre os mais desafiadores em termos de descarbonização, em razão da elevada densidade energética requerida e das restrições de peso e volume das aeronaves. Os chamados combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) podem ser produzidos a partir de diferentes rotas, incluindo rotas baseadas em hidrogênio verde e fontes de carbono renováveis (biomassa, resíduos ou CO₂ capturado).

Nesta alternativa, considera-se o uso do hidrogênio renovável como insumo em processos de síntese de hidrocarbonetos líquidos compatíveis com o querosene de aviação, seja via *Power-to-Liquids* (PtL) ou rotas híbridas que combinam matérias-primas biogênicas com hidrogênio verde. Esses combustíveis podem ser utilizados em aeronaves atuais com adaptações limitadas de infraestrutura, o que explica o interesse regulatório em misturas mínimas obrigatórias de SAF em frotas comerciais.

3.3.5 Gás natural sintético – SNG (A5)

O gás natural sintético (synthetic natural gas – SNG) é produzido a partir da reação entre hidrogênio renovável e dióxido de carbono, resultando em uma mistura rica em metano de baixa intensidade de carbono. Essa rota permite utilizar a infraestrutura existente de gás natural – dutos, compressores, sistemas de medição – para transportar e distribuir energia derivada do hidrogênio, reduzindo a necessidade de investimentos imediatos em novas redes.

No contexto deste estudo, a alternativa A5 representa o uso de hidrogênio verde na produção de SNG para injeção em redes de gás ou para atendimento a consumidores industriais e termelétricos. A atratividade dessa rota depende, entre outros fatores, do custo de captura de CO₂, da compatibilidade com especificações de qualidade do gás e das políticas de incentivo à redução de emissões na cadeia de gás natural.

3.3.6 Eletricidade via células a combustível (A6)

Outra rota de aplicação relevante é a geração de eletricidade a partir de células a combustível alimentadas com hidrogênio verde. As células a combustível convertem energia química diretamente em energia elétrica, com elevada eficiência e baixas emissões locais, produzindo água como subproduto principal. Elas podem ser utilizadas tanto em aplicações estacionárias (backup de data centers, sistemas remotos, microrredes) quanto em aplicações móveis (veículos leves, ônibus, caminhões e embarcações).

No âmbito do presente estudo, a alternativa A6 representa o uso do hidrogênio produzido na usina experimental para geração de eletricidade em células a combustível, seja para consumo local em edificações do campus, seja para aplicações de mobilidade em escala piloto. Essa rota ilustra o potencial do hidrogênio como armazenador de energia elétrica renovável, contribuindo para aumentar a flexibilidade e a segurança do sistema.

3.3.7 Combustíveis para transporte marítimo (A7)

O transporte marítimo responde por parcela significativa das emissões globais de CO₂, e a Organização Marítima Internacional (IMO) vem estabelecendo metas progressivas de redução de intensidade de carbono dos combustíveis utilizados pela frota internacional. Nesse contexto, diferentes rotas baseadas em hidrogênio verde têm sido estudadas para combustíveis marítimos de baixo carbono, incluindo amônia, metanol, combustíveis sintéticos e misturas com óleos combustíveis convencionais.

Na alternativa A7, considera-se o uso de hidrogênio verde na produção de combustíveis destinados ao transporte marítimo de carga, seja por meio de moléculas como amônia e metanol verdes, seja por combustíveis sintéticos produzidos via rotas PtL. A atratividade dessa rota depende da evolução das exigências regulatórias internacionais, da disponibilidade de infraestrutura portuária adaptada e da competição com outras tecnologias (como o uso direto de gás natural liquefeito – GNL).

3.3.8 Síntese e implicações para o problema de decisão

As rotas descritas acima cobrem setores com perfis muito distintos de investimento, maturidade tecnológica, potencial de mercado e requisitos de infraestrutura. Algumas alternativas dialogam diretamente com cadeias já estabelecidas no Brasil, como fertilizantes (A1) e derivados químicos (A2), enquanto outras apontam para mercados emergentes, como o aço verde (A3) e os combustíveis sustentáveis para aviação e transporte marítimo (A4 e A7). Há, ainda, rotas que exploram a integração entre o hidrogênio e o sistema energético existente, como o SNG (A5) e a geração elétrica em células a combustível (A6).

Essas múltiplas possibilidades configuram um espaço decisório complexo, em que diferentes alternativas competem por recursos limitados e apresentam trade-offs entre custo de investimento, potencial de demanda, desempenho técnico, benefícios ambientais e requisitos logísticos. Em particular, quando se considera uma usina experimental de hidrogênio com orçamento restrito para investimentos adicionais, o problema se torna o de selecionar um portfólio de rotas de aplicação que maximize o benefício global sob múltiplos critérios de avaliação.

Essa característica justifica o uso de métodos multicritério de apoio à decisão, capazes de estruturar o problema em termos de alternativas, critérios e preferências do decisor, e, em especial, do método FITradeoff em sua variante de análise de portfólio com abordagem benefício–custo, tema das seções seguintes.

Com base na revisão de literatura apresentada no Capítulo 2, nas discussões com a equipe técnica da usina experimental e nas prioridades institucionais da UFMS, foram selecionadas sete rotas de aplicação do hidrogênio verde como alternativas para análise multicritério. Essas rotas correspondem a usos potenciais do hidrogênio produzidos pela usina em setores industriais e energéticos considerados estratégicos para a transição de baixo carbono.

As alternativas foram codificadas como A1 a A7, de forma consistente com o que é apresentado no referencial teórico. Para evitar repetição, omite-se aqui a lista detalhada das alternativas. Uma visão integrada das sete rotas selecionadas é apresentada na Tabela 1 no início desta seção e no esquema ilustrado na Figura 8. As descrições completas de cada alternativa encontram-se nas subseções 3.3.1 a 3.3.7.

Na prática, essas sete alternativas constituem o conjunto $A = \{A1, A2, \dots, A7\}$ sobre o qual será aplicada a metodologia multicritério. As descrições detalhadas das rotas, apresentadas na seção 3.3, servem como base para a construção dos indicadores de desempenho de cada alternativa na matriz de decisão.

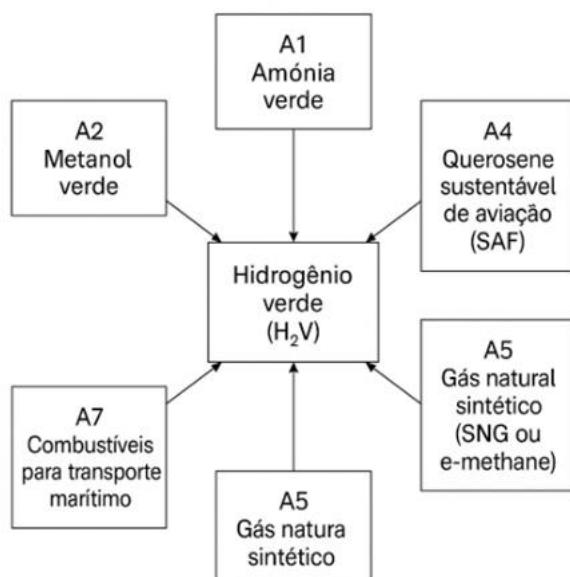


Figura 8 – Esquema das alternativas A1–A7 de aplicação do hidrogênio verde consideradas no estudo.
Elaboração própria.

3.4 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS E CONSTRUÇÃO DA MATRIZ DE DECISÃO

3.4.1 Critérios de avaliação

A seleção das rotas de aplicação do hidrogênio verde foi tratada como um problema de decisão multicritério, no qual diferentes dimensões de desempenho precisam ser consideradas simultaneamente. Em conjunto com o decisor e nos dados disponíveis, foram definidos cinco critérios (C1–C5), que refletem aspectos econômicos, de mercado, técnicos, ambientais e logísticos:

- C1 – Viabilidade financeira/econômica (CAPEX específico)

Representa o custo de investimento por unidade de capacidade ou de produto, expresso em termos de CAPEX específico (por exemplo, US\$/t de produto ou US\$/unidade de capacidade associada à rota). Esse critério procura capturar o esforço de investimento necessário para viabilizar cada rota, a partir de estimativas construídas com base em estudos de engenharia, literatura técnica e planilhas elaboradas pela equipe do projeto.

Tipo: quantitativo.

Orientação: minimizar (menor CAPEX específico é preferível).

- C2 – Demanda de mercado potencial

Expressa a demanda potencial para cada produto associado às alternativas, aproximada a partir de dados de comércio exterior e de mercado. Uma das principais fontes utilizadas foram dados do Comex Stat para o estado de Mato Grosso do Sul e para o Brasil, considerando códigos NCM representativos de amônia, metanol, gás natural, combustíveis de aviação e marítimos, entre outros. Em particular, adotou-se a hipótese de que uma fração (por exemplo, 1 % das importações brasileiras em 2024) poderia representar um mercado-alvo potencial para rotas de exportação ou substituição de importações, ajustada à escala da usina experimental e ao contexto regional.

Tipo: quantitativo (por exemplo, toneladas/ano ou índice derivado).

Orientação: maximizar (maior demanda potencial é preferível).

- C3 – Viabilidade técnica (consumo específico de H₂)

Corresponde ao consumo específico de hidrogênio por tonelada de produto final (ou unidade de serviço) para cada rota. Esse critério está ligado à eficiência de conversão e foi estimado com base em estudos de processo, fatores estequiométricos e literatura técnica. Rotas que demandam menos hidrogênio por unidade de produto tendem a ser mais atrativas

para uma usina experimental com produção limitada, pois permitem maior aproveitamento do H₂ produzido.

Tipo: quantitativo (kg H₂/t de produto, por exemplo).

Orientação: minimizar (menor consumo específico é preferível).

- C4 – Sustentabilidade (redução de emissões)

Reflete o potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa associado a cada rota, em comparação com um cenário de referência baseado em tecnologias convencionais (por exemplo, produção de amônia cinza, metanol fóssil, aço convencional, querosene de aviação fóssil). Esse critério foi construído a partir de fatores de emissão encontrados na literatura e em estudos de avaliação de ciclo de vida, quando disponíveis, e complementado por hipóteses da equipe técnica.

Tipo: quantitativo (por exemplo, tCO₂ evitadas por tonelada de produto ou índice de redução).

Orientação: maximizar (maior redução de emissões é preferível).

- C5 – Armazenamento e transporte (logística)

Avalia a facilidade de armazenamento, manuseio e transporte dos produtos associados às rotas, considerando aspectos como necessidade de infraestrutura dedicada, exigências de segurança, compatibilidade com logística existente e complexidade regulatória. Esse critério foi operacionalizado em uma escala ordinal, atribuída pela equipe do projeto com base em conhecimento técnico e na literatura: por exemplo, de 1 (logística mais complexa) a 5 (logística relativamente simples), associando valores mais altos a rotas com maior facilidade logística.

Tipo: qualitativo ordinal (convertido em escala numérica para o modelo).

Orientação: maximizar (maior facilidade logística é preferível).

Para organizar essas informações, apresenta-se a Tabela 2, que sintetiza os critérios, suas unidades e orientações:

Tabela 2 – Critérios de avaliação das alternativas de aplicação do hidrogênio verde

Critério	Nome	Descrição	Unidade / Escala	Tipo	Sentido de preferência
----------	------	-----------	------------------	------	------------------------

C1	Viabilidade financeira / econômica	Custo de investimento por unidade de capacidade ou produto (CAPEX específico).	US\$/t ou US\$/unidad e de capacidade	Quantitativo	Minimizar
C2	Demandas de mercado potencial	Demandas potenciais do produto associadas a cada rota, estimadas a partir de dados de comércio exterior.	t/ano ou índice derivado	Quantitativo	Maximizar
C3	Viabilidade técnica	Consumo específico de hidrogênio por tonelada de produto (eficiência de conversão).	kg H ₂ /t de produto	Quantitativo	Minimizar
C4	Sustentabilidade (redução de emissões)	Potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa em relação à tecnologia convencional.	tCO ₂ evitadas/t de produto ou índice	Quantitativo	Maximizar

C5	Armazenamento e transporte (logística)	Facilidade de armazenamento, manuseio e transporte dos produtos, considerando infraestrutura e segurança.	Escala ordinal (1 a 5)	Qualitativo	Maximizar
----	--	---	------------------------	-------------	-----------

3.4.2 Construção da matriz de decisão

A partir das alternativas (A1–A7) e dos critérios (C1–C5) definidos, foi construída uma matriz de decisão, na qual cada célula representa o desempenho de uma alternativa (a) em um critério (j). A matriz foi elaborada inicialmente em planilha eletrônica, consolidando informações provenientes de diferentes fontes (YUE et al., 2021; EMERIK, 2023; IEA, 2019; IRENA, 2020a):

- Estudos de engenharia e simulações de processo para estimar CAPEX específico (C1) e consumo específico de hidrogênio (C3) em cada rota, com base no projeto da usina experimental e em parâmetros de eficiência reportados na literatura (YUE et al., 2021; EMERIK, 2023);
- Dados de comércio exterior para quantificar a demanda potencial (C2), incluindo a tabela elaborada a partir do Comex Stat com valores de importação e exportação associados a códigos NCM relevantes para cada alternativa, complementados por diagnósticos de mercado de hidrogênio e derivados no contexto brasileiro (GIZ, 2021; OLIVEIRA, 2022);
- Literatura técnica e relatórios de emissões para estimar o potencial de redução de emissões (C4) das rotas, considerando o papel do hidrogênio de baixo carbono na descarbonização de setores difíceis de abater (IEA, 2019; STOLTEN; EMONTS, 2016; NELSON et al., 2020);
- Julgamento de especialistas e da equipe do projeto para atribuir pontuações de facilidade logística (C5) em escala ordinal, à luz de evidências sobre desafios de armazenamento, transporte e mistura do hidrogênio em infraestruturas existentes apresentadas na literatura (SCHIEBAHN et al., 2015; IRENA, 2020a; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020).

A tabela de NCM e fluxos de comércio, elaborada em planilha interna, foi utilizada como base para derivar o indicador de demanda de mercado (C2). Essa tabela inclui, para cada

produto associado às alternativas, o código NCM correspondente, bem como os volumes de importação e exportação observados em Mato Grosso do Sul e no Brasil em 2024, permitindo inferir a relevância econômica relativa de cada rota:

Tabela 3 – Panorama de comércio exterior das rotas de aplicação selecionadas (NCM, importações e exportações)

Alternativa / Produto	NCM	Importação (MS, t)	Exportação (MS, t)
Amônia verde	2814.20.00	0,00	0,00
Metanol verde	2905.11.00	190,11	0,00
Aço verde	7325.99.10	0,00	0,00
Querosene sustentável de aviação (SAF)	2710.19.19 / 2710.19.11	0,00	696,95
Gás natural sintético (SNG ou e-methane)	2711.11.00	31 662,99	0,00
Eletricidade via células combustível	2716.00.00	0,00	0,00
Combustíveis para transporte marítimo	2710.19.29	0,00	0,00

A partir desses dados, foi construído, para cada alternativa, um valor representativo de demanda potencial, considerando tanto a ordem de grandeza das importações nacionais quanto a possibilidade de atuação regional da usina experimental.

A matriz de decisão final, com os valores de desempenho originais (antes da normalização), foi compilada a partir dos dados de engenharia, mercado e literatura e é apresentada na Figura 9. Essa figura mostra os desempenhos das alternativas A1–A7 em cada critério C1–C5, antes da normalização.

Alternativa	C1	C2	C3	C4	C5
A1	36	100	46	82	40
A2	33	29	17	61	93
A3	46	27	100	91	20
A4	0	41	38	65	73
A5	13	45	21	88	17
A6	100	0	79	78	85
A7	40	78	0	0	100

Figura 9– Matriz de decisão com os desempenhos originais das alternativas (A1–A7) em cada critério (C1–C5). Elaboração própria a partir de dados de engenharia, mercado e literatura.

No Capítulo 3, o foco é explicar como a matriz foi construída, sem ainda discutir os resultados em si. A etapa de normalização dos desempenhos e a entrada desses dados no sistema FITradeoff são detalhadas na seção 3.5, dedicada à aplicação do método.

3.5 FASE 3 – APLICAÇÃO DO MÉTODO FITRADEOFF

A terceira fase consistiu na aplicação do método FITradeoff ao conjunto de alternativas e critérios definidos, estendendo-o à sua variante de seleção de portfólio com abordagem benefício–custo (B/C), adequada ao tratamento de problemas de seleção sob restrição de recursos, como é o caso da usina experimental de hidrogênio verde. Nessa etapa, os dados consolidados na matriz de decisão foram inseridos no sistema de apoio à decisão (FITradeoff DSS) e o decisor, descrito na Seção 3.1, passou a interagir com o método para elicitação das preferências.

Os principais passos dessa fase podem ser sintetizados como segue.

3.5.1 Normalização dos desempenhos

Inicialmente, os valores da matriz de decisão foram convertidos para uma escala comum, com o objetivo de permitir a comparação entre critérios com unidades e ordens de grandeza distintas em uma base adimensional. Foram adotadas funções de normalização coerentes com o sentido de preferência de cada critério (maximizar ou minimizar), de forma a garantir que valores mais altos na escala normalizada correspondessem, em todos os casos, a desempenhos mais atrativos segundo as definições estabelecidas no Capítulo 2.

O resultado dessa etapa foi uma matriz de desempenhos normalizados, representada por

$\tilde{v}_j(a)$, para cada alternativa a e critério j . Essa matriz normalizada serviu de entrada direta para o modelo aditivo de valor utilizado pelo FITradeoff.

3.5.2 Configuração do problema de portfólio

Em seguida, procedeu-se à configuração do problema no FITradeoff DSS. Cada alternativa (A1–A7) foi cadastrada com:

- seus desempenhos normalizados em cada critério (C1–C5);
- o custo associado à implementação da rota, obtido a partir do CAPEX específico agregado, conforme detalhado na Seção 3.6;
- a indicação do sentido de preferência de cada critério (maximizar/minimizar).

Além disso, foi definido, em conjunto com o decisor, um orçamento máximo de investimento para o portfólio de rotas, compatível com a escala da usina experimental. A partir desses dados, o módulo de portfólio do FITradeoff foi configurado para gerar combinações possíveis de alternativas que respeitassem a restrição orçamentária e permitissem a maximização do benefício multicritério total.

3.5.3 Elicitação interativa das preferências

Com o problema configurado, iniciou-se o processo de elicitação interativa das preferências do decisor. O FITradeoff apresentou, em cada iteração, cenários de compromisso envolvendo diferentes combinações de desempenhos em dois ou mais critérios, solicitando ao decisor que indicasse: qual cenário era estritamente preferido; ou se havia indiferença entre os cenários apresentados.

Cada resposta foi automaticamente traduzida pelo sistema em um conjunto de restrições lineares sobre as constantes de escala dos critérios, reduzindo progressivamente a região de vetores de pesos admissíveis. A cada nova interação, o método utilizou as informações já obtidas para formular perguntas que tivessem maior potencial de reduzir a incerteza sobre as preferências sem sobrecarregar cognitivamente o decisor.

Após algumas iterações, obteve-se um conjunto de pesos compatíveis com os julgamentos expressos, delimitando uma região viável de preferências na qual era possível avaliar e comparar as alternativas de forma consistente com as respostas fornecidas.

3.5.4 Geração do ranking e do portfólio ótimo

Com base na função de valor resultante – construída a partir dos desempenhos normalizados e da região de pesos admissíveis – e na restrição orçamentária global, o módulo de seleção de portfólio com abordagem benefício–custo (B/C) do FITradeoff foi utilizado para resolver o problema de seleção de portfólio. O modelo passou a considerar, simultaneamente: o valor multicritério de cada alternativa ($V(a)$); e o custo associado ($c(a)$); buscando identificar os subconjuntos de alternativas que maximizassem o benefício total sob o limite de investimento estabelecido.

O modelo retornou, assim, tanto o ranking individual das alternativas (considerando o valor multicritério) quanto o portfólio ótimo recomendado para o orçamento analisado. Esses resultados – incluindo gráficos, representações em diagrama de Hasse e análises complementares geradas pelo FITradeoff – são apresentados e discutidos em detalhe no Capítulo 4, dedicado à análise dos resultados.

3.6 Fase 4 – Definição do custo das alternativas, tratamento dos dados e hipóteses adotadas

A quarta fase concentrou-se na definição do custo das alternativas, no tratamento da base de dados utilizada na matriz de decisão e na explicitação das principais hipóteses adotadas no estudo. Em particular, foi necessário construir, para cada rota de aplicação (A1–A7), um indicador de custo que fosse coerente com a realidade de uma usina experimental e, ao mesmo tempo, utilizável tanto como: medida de viabilidade financeira/econômica (critério C1); e parâmetro de custo no módulo de portfólio do FITradeoff, ligado à restrição orçamentária global.

Como nem todos os dados de custo estavam disponíveis de forma consolidada em fontes públicas ou em projetos industriais de grande escala, adotou-se o seguinte procedimento:

1. Foram elaboradas planilhas de custo para cada alternativa, nas quais se estimaram os custos unitários (US\$/t de produto) associados à implantação de cada rota em escala compatível com a usina experimental. Essas planilhas consideraram informações de literatura, dados de referência de projetos semelhantes e valores simulados, ajustados à realidade da planta piloto.

2. As planilhas foram construídas com base em valores simulados, calibrados de modo a manter coerência com as faixas de custo observadas no mercado e com a maturidade tecnológica das rotas, evitando tanto subestimar quanto superestimar ordens de grandeza. O objetivo não foi reproduzir exatamente o custo de projetos industriais em escala plena, mas obter valores representativos para análise comparativa no contexto do estudo de caso.

3. Para fins do modelo, o valor registrado na matriz de decisão para C1 correspondeu a um CAPEX específico agregado para cada rota, utilizado simultaneamente como:

- indicador de viabilidade financeira/econômica (critério C1); e
- parâmetro de custo no módulo de portfólio do FITradeoff, associado à restrição orçamentária global de investimento.

Além da questão de custos, algumas hipóteses gerais foram adotadas na construção da base de dados e na interpretação dos resultados:

- As condições de mercado (demanda e preços relativos) consideradas refletem uma situação de referência no curto e médio prazo, adequada ao horizonte de análise da usina experimental. Não se buscou projetar cenários detalhados de longo prazo, mas sim capturar a ordem de grandeza das oportunidades de mercado associadas a cada rota.
- Todas as tecnologias analisadas foram tratadas como estando em estágio de desenvolvimento compatível com implantação em escala piloto ou de demonstração, coerente com a natureza da usina estudada. Assim, não foram incluídas rotas ainda puramente conceituais ou sem qualquer evidência de demonstração prática.
- O orçamento de investimento disponível foi considerado fixo no horizonte de planejamento analisado, de forma que as decisões de alocação de recursos entre as rotas de aplicação são vistas como alternativas excludentes sob uma mesma restrição de recursos.

Como parte da metodologia, também foram realizados testes de sensibilidade, variando parâmetros como custos, orçamento disponível e constantes de escala dos critérios, para avaliar a robustez das recomendações. Os resultados dessas análises são apresentados com mais detalhe no Capítulo 4.

Essas hipóteses e o uso de valores simulados são práticas aceitáveis em estudos exploratórios e em análises de apoio à decisão em contextos com dados limitados, desde que explicitadas de forma transparente – como se faz aqui – e validadas com especialistas envolvidos no projeto. No contexto deste trabalho, as hipóteses foram discutidas e consideradas razoáveis pelo decisor e pela equipe técnica da usina experimental, servindo como base para a construção do modelo multicritério e para a interpretação dos resultados apresentados nos capítulos seguintes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a aplicação do método FITradeoff ao problema de portfólio das rotas de aplicação do hidrogênio verde produzido na usina experimental. São discutidos o ranking das alternativas, a composição do portfólio ótimo sob restrição orçamentária e os principais achados da análise de sensibilidade, bem como as implicações gerenciais para a usina.

De forma geral, a aplicação do modelo multicritério resultou em um ranking que posiciona o metanol verde (Alternativa 2) como opção mais atrativa para investimento inicial. Em seguida aparecem a eletricidade via células a combustível (Alternativa 6), a amônia verde (Alternativa 1) e o aço verde (Alternativa 3), que, além de bem avaliadas, compõem o portfólio recomendado dentro do limite orçamentário de US\$ 5.000.000,00 (aproximadamente R\$ 26.659.500,00, segundo cotações atuais), valor estipulado pela gestão da usina para o cenário analisado. As demais rotas – gás natural sintético (A5), combustíveis marítimos (A7) e combustível sustentável de aviação (A4) – aparecem em posições inferiores no ranking, mas ainda são consideradas alternativas tecnologicamente viáveis em horizontes mais longos.

4.1 ANÁLISE DO RANKING E COMPOSIÇÃO DO PORTFÓLIO

A figura 10 apresenta simultaneamente o custo individual e o custo acumulado de cada alternativa, bem como o ranking final obtido a partir do software FITradeoff DSS. Esse gráfico permite visualizar como as alternativas vão sendo adicionadas ao portfólio à medida que o orçamento disponível é consumido, evidenciando quais combinações maximizam o benefício multicritério sob a restrição de recursos.

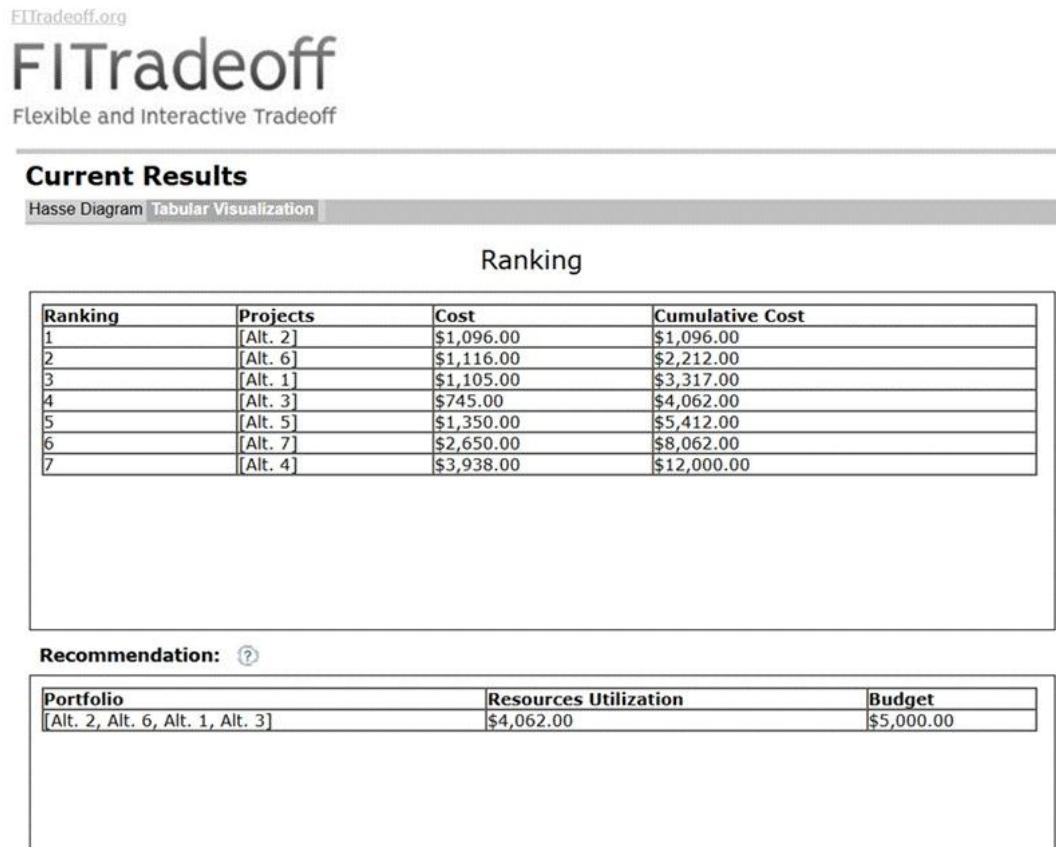


Figura 10 – Custo individual, custo acumulado e ranking das alternativas de aplicação do hidrogênio verde.

A partir desse resultado, observa-se que o FITradeoff gerou um ranking completo das alternativas, cuja ordenação pode ser sintetizada da seguinte forma:

A2 > A6 > A1 > A3 > A5 > A7 > A4,

indicando que:

- A2 – Metanol verde ocupa a primeira posição do ranking, combinando baixo custo relativo de implementação, demanda de mercado elevada e logística relativamente consolidada no contexto químico e energético
- A6 – Eletricidade via células a combustível aparece em seguida, refletindo o potencial de integrar o hidrogênio a aplicações de geração elétrica distribuída e mobilidade em escala piloto;
- A1 – Amônia verde assume a terceira posição, associada tanto ao setor de fertilizantes quanto ao papel estratégico da amônia como portadora de hidrogênio;

- A3 – Aço verde ocupa a quarta posição, permanecendo relevante para a descarbonização de cadeias siderúrgicas, embora com custos de implantação mais elevados.

As alternativas A5 (gás natural sintético), A7 (combustíveis marítimos) e A4 (combustível sustentável de aviação) ocupam as últimas posições, principalmente em função de combinações menos favoráveis entre custo, demanda potencial e maturidade relativa das rotas no cenário considerado.

A Figura 11 apresenta o fluxograma de ordenação das alternativas gerado pelo FITradeoff DSS, evidenciando de forma gráfica a posição relativa de cada alternativa no ranking final e as relações de dominância entre elas.

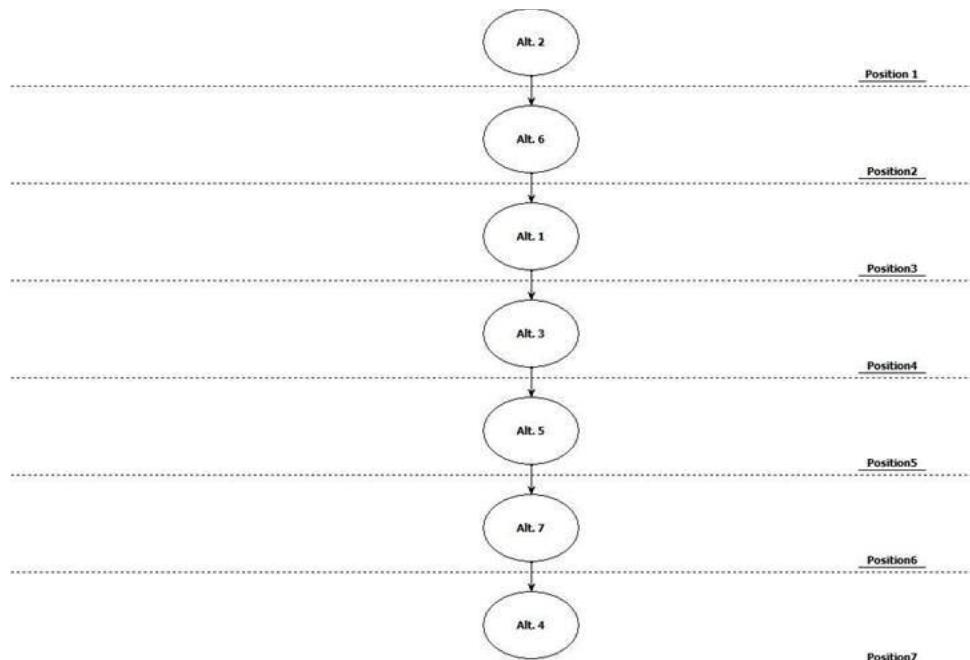


Figura 11- Fluxograma de ordenação das alternativas gerado pelo FITradeoff DSS.

No que se refere à composição do portfólio, a Figura 11 indica que as quatro primeiras alternativas do ranking – metanol verde (A2), eletricidade via células a combustível (A6), amônia verde (A1) e aço verde (A3) – apresentam custos individuais inferiores a aproximadamente US\$ 1.200.000,00. Quando combinadas, essas quatro alternativas: totalizam US\$ 4.062.000,00, o que representa cerca de 81 % do orçamento disponível de US\$ 5.000.000,00.

Essa combinação constitui o portfólio ótimo identificado pela abordagem de seleção de portfólio multicritério com o método FITradeoff e razão benefício–custo (BCR), isto é, o subconjunto de alternativas que maximiza o benefício multicritério agregado sem ultrapassar o limite orçamentário.

Além disso, a Figura 12 apresenta os intervalos admissíveis dos pesos dos critérios (C1–C5) no modelo FITradeoff, permitindo analisar a influência relativa de cada dimensão na priorização das alternativas.

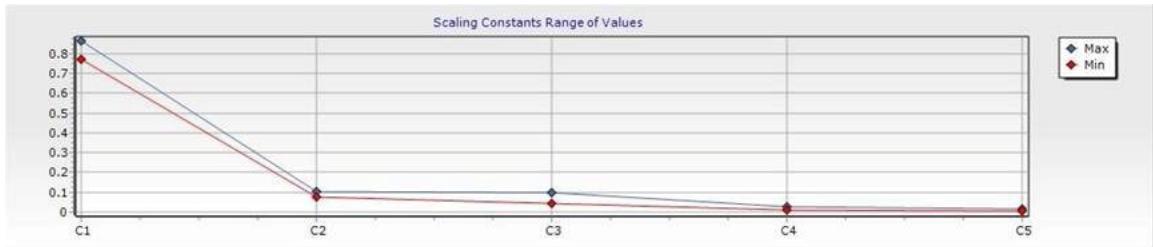


Figura 12 – Intervalos admissíveis dos pesos dos critérios (C1–C5) no modelo FITradeoff.

Conforme ilustrado nessa figura, o critério de Viabilidade Econômica (C1) apresentou dominância na estrutura decisória, com faixa admissível de peso entre 0,76 e 0,80, indicando forte influência na priorização das alternativas. Já o critério de logística (C5) exibiu impacto marginal no modelo, com pesos inferiores a 0,05, enquanto os demais critérios apresentaram influência intermediária. Em termos práticos, isso significa que, no contexto da usina experimental e do orçamento restrito analisado, considerações econômicas foram decisivas na escolha das rotas a serem priorizadas, ainda que os benefícios ambientais e logísticos permaneçam relevantes como condicionantes de viabilidade.

Esses resultados reforçam que o portfólio recomendado – composto pelas alternativas A2, A6, A1 e A3 – otimiza a alocação dos recursos disponíveis, respeitando as restrições econômicas e logísticas da usina experimental e explorando, ao mesmo tempo, diferentes cadeias de valor (química, energia elétrica e siderurgia).

4.2 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade teve como objetivo verificar a robustez das recomendações obtidas frente a variações moderadas nos parâmetros do modelo, em especial: nos pesos dos critérios, nos custos das alternativas e no orçamento disponível. Inicialmente, foram realizadas simulações em que os limites dos pesos dos critérios foram alterados em aproximadamente $\pm 10\%$ em relação aos valores de referência. Os resultados indicaram que: a composição do portfólio ótimo permaneceu inalterada e as posições das primeiras alternativas no ranking sofreram apenas pequenas oscilações nos valores globais de utilidade, sem alteração da ordem relativa entre A2, A6, A1 e A3.

A Figura 12, já discutida anteriormente, mostra que o critério Viabilidade Econômica (C1) mantém a maior faixa admissível de peso (0,76 a 0,80) mesmo após as variações realizadas,

confirmado sua preponderância nas decisões. Em contraste, o critério de logística/armazenamento (C5) apresenta faixas muito estreitas (inferiores a 0,05), indicando influência limitada na diferenciação entre alternativas. Os demais critérios – associados à demanda de mercado, viabilidade técnica e redução de emissões – situam-se em faixas intermediárias, desempenhando papel importante, mas não dominante, na definição das prioridades.

Esse comportamento corrobora a robustez e a confiabilidade dos resultados, demonstrando que o modelo mantém estabilidade mesmo sob condições de incerteza moderada nos parâmetros de preferência do decisor. Em outras palavras, pequenas variações nos pesos e nos custos não levam a mudanças drásticas na recomendação final, o que aumenta a confiança da usina em utilizar o portfólio proposto como base para planejamento de investimentos.

4.3 Discussão das implicações para a usina experimental

Os resultados obtidos indicam que o portfólio formado pelas alternativas metanol verde (A2), eletricidade via células a combustível (A6), amônia verde (A1) e aço verde (A3) constitui a combinação mais atrativa para o cenário analisado, utilizando aproximadamente 81 % do orçamento disponível de US\$ 5.000.000,00. Essa configuração é coerente com a natureza experimental da usina, cuja capacidade de produção de 20 Nm³/h de hidrogênio verde, em operação contínua (24/7), caracteriza um projeto em escala piloto, voltado simultaneamente para: aprendizado tecnológico sobre diferentes rotas de aplicação e geração de receitas iniciais em cadeias de valor já existentes. Essa leitura é consistente com as informações técnicas detalhadas no documento interno “Visão Geral – Usina Hidrogênio”, que descreve a configuração, a capacidade de produção e os objetivos da planta piloto.

Do ponto de vista econômico, a forte dominância do critério Viabilidade Econômica (C1) – com pesos mantidos na faixa de 0,76 a 0,80 mesmo após as análises de sensibilidade – evidencia que o decisor atribui elevada importância à recuperação do investimento e à redução do risco financeiro na fase inicial do empreendimento. Esse aspecto explica por que alternativas com menor CAPEX relativo e maior potencial de mercado, como o metanol verde e a eletricidade via células a combustível, assumem as primeiras posições no ranking. Em um contexto de orçamento restrito, a preferência por alternativas economicamente mais atrativas tende a: acelerar o payback do projeto, facilitar a negociação com investidores e

parceiros industriais e fortalecer a sustentabilidade econômico-financeira da usina no curto prazo.

Por outro lado, os resultados mostram que os critérios associados à sustentabilidade ambiental e à logística de armazenamento/transporte apresentaram pesos bastante reduzidos (inferiores a 0,05), indicando influência limitada na diferenciação entre as alternativas na fase atual. Isso não significa que o componente ambiental seja irrelevante todas as rotas envolvem o uso de hidrogênio de baixo carbono, mas que, entre alternativas já “verdes”, as diferenças marginais de emissões e de complexidade logística não foram determinantes para a decisão. Do ponto de vista gerencial, isso sugere que: a principal alavanca de diferenciação entre as rotas avaliadas, no estágio atual, é econômica e de mercado, mudanças em políticas públicas, preços de carbono ou incentivos regulatórios podem, no futuro, revalorizar critérios ambientais e logísticos, alterando a atratividade relativa entre rotas.

A composição do portfólio também possui implicações estratégicas para o posicionamento da usina em cadeias de valor futuras. A presença simultânea de: produtos direcionados a setores industriais consolidados – como fertilizantes (amônia verde) e siderurgia (aço verde) e de combustíveis/vetores energéticos com potencial de crescimento acelerado – como metanol verde e eletricidade via células a combustível – permite diversificar riscos e ampliar o leque de parcerias com empresas dos segmentos químico, de transporte, de geração elétrica e de tecnologia energética. Essa diversificação é particularmente relevante em um projeto piloto, no qual ainda há incerteza quanto ao ritmo de expansão da demanda por cada rota tecnológica.

Por fim, a aplicação do método FITradeoff mostrou-se adequada para apoiar esse processo decisório, uma vez que: possibilitou a elicitização estruturada das preferências do decisor; gerou recomendações transparentes e justificáveis, associando explicitamente o ranking e o portfólio às constantes de escala dos critérios e aos desempenhos relativos das alternativa e permitiu incorporar, de maneira sistemática, dimensões econômicas, técnicas, ambientais e logísticas em uma única estrutura de decisão (ALMEIDA; COSTA, 2013).

Dessa forma, o modelo multicritério reduziu a dependência de julgamentos isolados, aumentou a consistência interna das escolhas realizadas e oferece uma base analítica para ajustes futuros no portfólio à medida que novos dados de mercado, custos e desempenho tecnológico forem sendo produzidos pela usina experimental.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar e priorizar rotas de aplicação do hidrogênio verde produzido em uma usina experimental em uma faculdade Brasileira, sob a perspectiva de um problema de decisão multicritério com restrição orçamentária, utilizando o método FITradeoff em sua variante de análise de portfólio custo–benefício (FiT Portfólio C/B). A partir da caracterização da usina, da definição das alternativas (A1–A7) e dos critérios (C1–C5), da construção da matriz de decisão e da interação com o decisor, foi possível identificar um portfólio de rotas de aplicação considerado mais atrativo para o contexto analisado.

Os resultados mostraram que o metanol verde (A2), a eletricidade via células a combustível (A6), a amônia verde (A1) e o aço verde (A3) constituem o portfólio recomendado para um orçamento total de US\$ 5.000.000,00, utilizando aproximadamente 81 % desse valor. Esse conjunto combina rotas com demanda de mercado relevante, potencial de descarbonização e custos de implantação compatíveis com a escala piloto da usina experimental, ao mesmo tempo em que permite o Brasil se posicionar em diferentes cadeias de valor relacionadas ao hidrogênio de baixo carbono.

A análise dos pesos indicou que o critério de Viabilidade Econômica (C1) exerceu papel preponderante, com faixa admissível de peso entre 0,76 e 0,80, enquanto o critério de logística/armazenamento (C5) apresentou influência marginal, com pesos inferiores a 0,05. Essa configuração reflete a prioridade atribuída pelo decisor à racionalidade econômica na fase inicial do empreendimento, sem deixar de considerar, porém, dimensões técnicas, ambientais e de mercado. As análises de sensibilidade mostraram que variações moderadas nos pesos e nos custos não alteraram a composição do portfólio ótimo, o que reforça a robustez das recomendações geradas pelo modelo.

De maneira geral, os resultados obtidos são coerentes com a realidade de uma usina experimental de 20 Nm³/h, cujo foco é combinar demonstração tecnológica com oportunidades de inserção gradual em nichos de mercado. O portfólio selecionado equilibra:

- (i) rotas associadas a cadeias industriais já consolidadas (amônia, metanol, siderurgia); e
- (ii) aplicações energéticas emergentes (células a combustível), ampliando o espaço para parcerias e aprendizado tecnológico no âmbito das universidades federais.

5.1 CONTRIBUIÇÕES DO ESTUDO

As principais contribuições deste trabalho podem ser sintetizadas em três dimensões: metodológica, aplicada e institucional.

Do ponto de vista metodológico, o estudo demonstra a viabilidade de aplicar a abordagem de seleção de portfólio multicritério com o método FITradeoff e razão benefício–custo a um problema real de planejamento de rotas de aplicação do hidrogênio verde em escala experimental. A combinação entre: definição explícita de alternativas (A1–A7) e critérios (C1–C5), construção de uma matriz de decisão apoiada em dados técnicos, de mercado e em valores simulados e interação estruturada com o decisor; mostrou-se adequada para tratar a natureza multicritério e orçamentariamente restrita do problema, fornecendo recomendações transparentes e justificáveis.

No âmbito aplicado, o trabalho oferece um exercício concreto de priorização de investimentos em uma usina piloto de hidrogênio verde, indicando um portfólio específico de rotas com maior atratividade para o cenário considerado. Ainda que baseado em valores de custo simulados e em hipóteses de mercado, o modelo fornece à gestão da usina um guia estruturado para decisões de médio prazo, ajudando a identificar quais rotas merecem maior atenção em termos de: desenvolvimento de parcerias industriais, detalhamento de projetos de engenharia e captação de recursos para investimentos adicionais.

Por fim, em termos institucionais, o estudo contribui para fortalecer o papel da Universidade como referência nacional em pesquisas sobre hidrogênio verde, ao demonstrar que a usina experimental pode ser utilizada não apenas como infraestrutura de demonstração tecnológica, mas também como laboratório de apoio à decisão em planejamento energético e industrial.

5.2 Discussão

Apesar das contribuições, é importante reconhecer as limitações do estudo, que decorrem principalmente da disponibilidade de dados e do estágio de desenvolvimento do tema:

- Os custos das alternativas foram estimados a partir de valores simulados e ajustados com base em faixas de referência disponíveis na literatura e em estudos de engenharia, e não a partir de projetos industriais detalhados em escala comercial. Embora adequados para comparação relativa entre rotas, esses valores não devem ser interpretados como estimativas precisas de investimento para implementação imediata em grande escala.
- A demanda de mercado (critério C2) foi aproximada com base em dados de comércio exterior e mercado atual, utilizando hipóteses simplificadas sobre frações de importações que poderiam ser atendidas por rotas de hidrogênio verde. Essa abordagem é útil para fins

de priorização, mas não substitui estudos específicos de mercado para cada produto, que considerem contratos, concorrência e barreiras regulatórias em maior detalhe.

- O processo de elicitação de preferências foi conduzido com um único decisor, responsável pela gestão da usina experimental. Ainda que esse decisor possua conhecimento técnico e visão estratégica sobre o projeto, a incorporação de múltiplos atores (por exemplo, representantes de diferentes setores industriais, governo, parceiros potenciais) poderia enriquecer o processo e capturar perspectivas adicionais, especialmente em decisões de maior escala.
- A análise foi realizada para um cenário específico de orçamento (US\$ 5.000.000,00) e para um conjunto fixo de alternativas e critérios. Mudanças substanciais nesses parâmetros – por exemplo, inclusão de novos critérios sociais ou de risco regulatório – podem alterar a atratividade relativa das rotas, exigindo revisões do modelo.

Essas limitações não invalidam os resultados alcançados, mas indicam que as recomendações devem ser interpretadas como apoio à decisão em um contexto exploratório, e não como determinação definitiva de um plano de investimentos em escala industrial.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

Diante das limitações apontadas e da natureza ainda emergente da economia do hidrogênio, diversas possibilidades se abrem para trabalhos futuros, tanto na linha metodológica quanto na aplicada. Entre elas, destacam-se:

- Aprimoramento da base de custos e da modelagem econômica das rotas, incorporando projetos conceituais mais detalhados, cotações de fornecedores e análises de sensibilidade mais abrangentes, incluindo variações em preços de energia, fatores de capacidade e custos de capital.
- Ampliação do conjunto de critérios, contemplando, por exemplo, impactos sociais, geração de empregos qualificados, risco regulatório e aceitação social das tecnologias em âmbito regional, de forma a tornar o modelo ainda mais abrangente para a realidade de políticas públicas e desenvolvimento regional.

- Incorporação de múltiplos decisores no processo de elicitação de preferências, utilizando extensões do FITradeoff para apoio à decisão em grupo. Isso permitiria considerar, de forma estruturada, a visão de diferentes atores envolvidos na cadeia do hidrogênio (gestores públicos, representantes industriais, comunidade acadêmica, entre outros).
- Atualização periódica do modelo à medida que a usina experimental acumular dados operacionais reais de desempenho, custos e confiabilidade das rotas testadas. Esses dados podem substituir hipóteses e valores simulados, tornando as análises futuras mais aderentes à realidade empírica da planta.
- Exploração de cenários alternativos de orçamento e políticas de incentivo, avaliando como mudanças em subsídios, preços de carbono ou linhas de financiamento específicas poderiam impactar a composição do portfólio ótimo de rotas de aplicação.

Ao seguir essas direções, futuros estudos poderão refinar e ampliar as conclusões aqui apresentadas, contribuindo para o amadurecimento da usina experimental como plataforma de inovação em hidrogênio verde e, ao mesmo tempo, para o desenvolvimento de ferramentas de apoio à decisão cada vez mais alinhadas aos desafios da transição energética no Brasil.

6 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. T. de. **Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério.** São Paulo: Atlas, 2013.
- ALMEIDA, A. T. de et al. **A new method for elicitation of criteria weights in additive models.** European Journal of Operational Research, v. 250, n. 1, p. 179–191, 2016.
- ALMEIDA, A. T. de; FREJ, E. A.; ROSELLI, L. R. P.; COSTA, A. P. C. S. **A summary on FITradeoff method with methodological and practical developments and future perspectives.** Pesquisa Operacional, v. 43, e268356, 2023.
- ARCOS, J. M. M.; SANTOS, D. M. F. **The hydrogen color spectrum: techno-economic analysis of the available technologies for hydrogen production.** Gases, v. 3, n. 1, p. 25–46, 2023.
- BELTON, V.; STEWART, T. J. **Multiple criteria decision analysis: an integrated approach.** Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂): diretrizes gerais.** Brasília, 2021.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano decenal de expansão de energia 2031.** Rio de Janeiro: EPE, 2021.
- FRANCO, A.; GIOVANNINI, C. **Recent and future advances in water electrolysis for green hydrogen generation: critical analysis and perspectives.** Sustainability, v. 15, n. 24, p. 16917, 2023.
- FREITAS, F. **O hidrogênio verde e amarelo.** Rio de Janeiro: FGV Energia, 2023.
- FREJ, E. A.; EKEL, P.; ALMEIDA, A. T. de. **A benefit-to-cost ratio based approach for portfolio selection under multiple criteria with incomplete preference information.** Information Sciences, v. 545, p. 487–498, 2021.
- IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Green hydrogen supply: a guide to policy making.** Abu Dhabi: IRENA, 2021.
- MARQUES, A. C.; FREJ, E. A.; ALMEIDA, A. T. de. **Multicriteria decision support for project portfolio selection with the FITradeoff method.** Omega, v. 111, 102661, 2022.
- MARSH, K. et al. **Multiple criteria decision analysis for health care decision making – an introduction: Report 1 of the ISPOR MCDA Emerging Good Practices Task Force.** Value in Health, v. 19, n. 1, p. 1–13, 2016.

MENDES, J. A. J.; ALMEIDA, A. T. de; MOTA, C. M. de M. **Evaluation of the flexible and interactive tradeoff method based on a real portfolio selection problem.** Pesquisa Operacional, v. 40, n. 2, p. 223–250, 2020.

UNITED NATIONS. **United Nations framework convention on climate change.** New York: United Nations, 1992.

UNITED NATIONS. **Paris agreement.** New York: United Nations, 2015.

VAN NUFFEL, L. et al. **Sector coupling: how can it be enhanced in the EU to foster grid stability and decarbonise?** Brussels: European Parliament, 2018.