UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL HENRIQUE MESQUITA PINHEIRO

SELEÇÃO DO MODO DE TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: UMA APLICAÇÃO DO MÉTODO PROMETHEE II FUZZY ESFÉRICO

FORTALEZA

2024

GABRIEL HENRIQUE MESQUITA PINHEIRO

SELEÇÃO DO MODO DE TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: UMA APLICAÇÃO DO MÉTODO PROMETHEE II FUZZY ESFÉRICO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P719s Pinheiro, Gabriel Henrique Mesquita.
Seleção do modo de transporte de hidrogênio verde no Brasil : uma aplicação do método PROMETHEE II fuzzy esférico / Gabriel Henrique Mesquita Pinheiro. – 2024.
60 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata.

1. Energias renováveis. 2. Métodos Multicritério de Apoio à Decisão. 3. Avaliação de alternativas. 4. Conjuntos fuzzy. 5. Logística de distribuição. I. Título.

CDD 620.1

GABRIEL HENRIQUE MESQUITA PINHEIRO

SELEÇÃO DO MODO DE TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: UMA APLICAÇÃO DO MÉTODO PROMETHEE II FUZZY ESFÉRICO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em: 17/12/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Nadya Regina Galo
Universidade Federal Fluminense (UFF)

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família, por nunca duvidar de minha capacidade e me apoiar em meus momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À minha família, por sempre me incentivar em relação à universidade e carreira acadêmica.

Ao Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata, pela excelentíssima orientação. Em suas palavras, "O dever do orientador é indicar o caminho correto, corrigindo os desvios". De fato, sua paciência e solicitude foram o que me motivaram a continuar no programa e a buscar excelência na pesquisa.

Aos professores participantes da banca examinadora Profa. Dra. Nadya Regina Galo e Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos participantes do questionário virtual, pelas ilustres opiniões que possibilitaram a execução da pesquisa.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

Ao meu amigo João Pedro Galdino Sampaio, pela ajuda com as permutações na planilha da análise de sensibilidade. Sem seu auxílio, o caminho seria certamente tortuoso.

Ao meu amigo, irmão de outra mãe, Igor Muriel da Silva Passos, pela amizade inestimável e sentimento de irmandade. Não há para mim algo tão autêntico, sincero e intocável quanto isso.

"Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes." (NEWTON, 1676.)

RESUMO

A transição energética da indústria brasileira é fomentada pela participação do país no Acordo de Paris. Nesse contexto, a utilização oportuna do Hidrogênio Verde (H_2V) possibilita a substituição de combustíveis poluentes e a sua integração em cadeias de produção, reduzindo a pegada de carbono no processo. Assim, o planejamento de sua logística de distribuição configura uma etapa essencial para garantir seu transporte seguro a potenciais consumidores. No âmbito da logística verde, métodos multicritério aliados a abordagens *fuzzy* são comumente aplicados, possibilitando a análise de múltiplos objetivos, por vezes conflitantes entre si, e opiniões subjetivas, ou incertas. Portanto, este estudo é destinado a ordenar os modos de transporte de H_2V, visando selecionar o de melhor desempenho no contexto decisório para abastecimento do mercado interno brasileiro, por meio da aplicação do *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations* (PROMETHEE) II *fuzzy* esférico. Para tal, foram coletadas e analisadas as opiniões de seis indivíduos experientes em hidrogênio a respeito de três alternativas de transporte e seis critérios de avaliação, em cinco casos de distribuição nacional. As alternativas são: gasoduto de gás natural adaptado, caminhão com H_2V comprimido ou com H_2V liquefeito; os critérios, por sua vez: custo de transporte, volume de H_2V transportado, risco de acidente no transporte, risco operacional em todo o processo logístico, pegada de carbono e distância ao consumidor. Nos resultados, verifica-se homogeneidade nos cinco cenários, com o gasoduto emergindo como a alternativa de melhor desempenho, seguido do H_2V liquefeito, com o transporte do produto comprimido em último lugar na ordenação. Complementarmente, destaca-se a natureza dinâmica do processo decisório, sendo deveras dependente das percepções cognitivas dos decisores a respeito de custo, riscos e distância. Por fim, por meio da análise de sensibilidade, calcula-se que o modelo apresenta uma robustez de 87%.

Palavras-chave: energias renováveis; métodos multicritério de apoio à decisão; avaliação de alternativas; conjuntos *fuzzy*; logística de distribuição.

ABSTRACT

Brazil's participation in the Paris Agreement drives the energy transition of its industry. In this context, the appropriate use of Green Hydrogen (GH_2) allows the replacement of polluting fuels and its integration into production chains, reducing the carbon footprint in the process. Planning its distribution logistics is thus an essential step to ensure safe transportation to potential consumers. In green logistics, multi-criteria methods combined with fuzzy approaches are commonly applied, enabling the analysis of multiple, sometimes conflicting, objectives and subjective or uncertain opinions. Therefore, this study aims to rank the transportation modes for GH_2 to select the best-performing option for supplying the Brazilian domestic market, applying the spherical fuzzy PROMETHEE II method. To this end, we gathered the opinions of six experts in hydrogen on three transportation alternatives and six evaluation criteria, across five national distribution scenarios. The alternatives include: adapted natural gas pipeline, truck transportation with compressed GH_2, or truck transportation with liquefied GH_2; the criteria are: transportation cost, volume of transported GH_2, risk of transportation accidents, operational risk throughout the logistics process, carbon footprint, and distance to the consumer. The results show consistency across the five cases, with the pipeline emerging as the top-performing alternative, followed by liquefied GH_2, and compressed GH_2 transport ranking last. Additionally, we highlight the dynamic nature of the decision-making process, which strongly depends on decision-makers' perceptions of cost, risks, and distance. Finally, we calculate the model's robustness to be 87% through a sensitivity analysis.

Keywords: renewable energies; multi-criteria decision-analysis; alternatives evaluation; fuzzy sets; distribution logistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de publicações contidas na *string* refinada entre 2005 e 2024 19
Figura 2 – Fluxograma do modelo utilizado 27
Figura 3 – Mapa de objetivos meios, fundamentais e estratégicos da investigação . . . 30
Figura 4 – Fração correspondente ao local de trabalho, ou estudo, dos participantes . . 38
Figura 5 – Fração correspondente ao cargo atual dos participantes 39
Figura 6 – Fração correspondente à experiência dos participantes com H_2V 39
Figura 7 – Pontuação dos critérios nas três alternativas de transporte 41
Figura 8 – Pontuação dos FE dos critérios no caso NE 44
Figura 9 – Valor de $\phi(x_i)$ no caso NE 45
Figura 10 – Pontuação dos FE dos critérios no caso N 46
Figura 11 – Valor de $\phi(x_i)$ no caso N 46
Figura 12 – Pontuação dos FE dos critérios no caso CO 47
Figura 13 – Valor de $\phi(x_i)$ no caso CO 48
Figura 14 – Pontuação dos FE dos critérios no caso SE 49
Figura 15 – Valor de $\phi(x_i)$ no caso SE 49
Figura 16 – Pontuação dos FE dos critérios no caso S 50
Figura 17 – Valor de $\phi(x_i)$ no caso S 50
Figura 18 – Percentual de robustez e mudança das alternativas 51
Figura 19 – Critérios máximos e mínimos, em nível de importância, nos cinco casos . . 53
Figura 20 – Frequência de inclusão dos critérios nas pontuações extremas 53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Revisão dos estudos anteriores acerca do transporte de H_2V 20
Tabela 2 – Alternativas do modelo 29
Tabela 3 – Critérios do modelo 30
Tabela 4 – Variáveis linguísticas de classificação das alternativas e dos critérios 33
Tabela 5 – Ordem dos resultados nos cenários da análise de sensibilidade 52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – *String* original e quantidade de publicações associadas 18
Quadro 2 – *String* refinada e quantidade de publicações associadas 19
Quadro 3 – Peso das opiniões dos decisores 40
Quadro 4 – Soluções ideais positiva e negativa 41
Quadro 5 – Valores de $RC[\tilde{c}_j(x_i)]$ no contexto decisório 41
Quadro 6 – Desvios entre pares de alternativas 42
Quadro 7 – Relação de preferência numérica entre pares de alternativas 42
Quadro 8 – FE dos critérios no caso NE 44
Quadro 9 – Fluxos de sobreclassificação do caso NE, s_1 45
Quadro 10 – Fluxos de sobreclassificação do caso NE, s_0 45
Quadro 11 – Posição individual das alternativas nos cenários da análise de sensibilidade 52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	*Analytic Hierarchy Process*
CRITIC	*CRiteria Importance Through Inter-criteria Correlation*
ELECTRE	*ÉLimination Et Choix Traduisant la REalité*
FE	Fatores de Escala
H_2V	Hidrogênio Verde
LOHC	*Liquid Organic Hydrogen Carrier* / Portador de Hidrogênio Orgânico Líquido
MARCOS	*Measurement of Alternatives and Ranking according to COmpromise Solution*
MAUT	*Multi-Attribute Utility Theory*
MCDA	*Multi-Criteria Decision-Analysis* / Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão
MCDM	*Multi-Criteria Decision-Making* / Metodologia Multicritério de Tomada de Decisão
MEP	Métodos de Estruturação de Problema
MEREC	*MEthod based on the REmoval effects of Criteria*
PNH2	Programa Nacional de Hidrogênio
PROMETHEE	*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations*
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SMART	*Simple Multi Attribute Rating Technique*
SMR	*Steam Methane Reforming* / Reforma a Vapor de Metano
SWAM	*Spherical Weighted Arithmetic Mean* / Média aritmética esférica ponderada
TOPSIS	*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*
UFC	Universidade Federal do Ceará
USP	Universidade de São Paulo
VFT	*Value-Focused Thinking*
VIKOR	*VIekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje*

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	13
1.1	**Considerações iniciais**	13
1.2	**Problemática e justificativa**	14
1.3	**Objetivos**	16
1.3.1	***Objetivo geral***	16
1.3.2	***Objetivos específicos***	16
1.4	**Estrutura da Dissertação**	16
2	**REVISÃO DE LITERATURA**	18
2.1	**Análise das publicações**	18
2.2	**Conceitos sobre conjuntos *fuzzy* esféricos**	24
2.2.1	***Operações matemáticas***	25
3	**METODOLOGIA**	27
3.1	**Identificação do contexto decisório**	28
3.2	**Estruturação do problema**	29
3.2.1	***Casos estudados***	31
3.3	**Atribuição dos fatores de escala: uma abordagem *fuzzy* esférica**	31
3.4	**Aplicação da MCDA: PROMETHEE II *fuzzy* esférico**	33
4	**RESULTADOS E DISCUSSÕES**	38
4.1	**Sobre os decisores**	38
4.2	**PROMETHEE II *fuzzy* esférico**	40
4.2.1	***Caso Nordeste***	43
4.2.2	***Caso Norte***	46
4.2.3	***Caso Centro-Oeste***	47
4.2.4	***Caso Sudeste***	48
4.2.5	***Caso Sul***	49
4.3	**Análise de sensibilidade**	51
4.4	**Disposições finais**	52
5	**CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, conceitos iniciais sobre hidrogênio e sua importância à política de transição energética nacional são apresentados na Seção 1.1. Na Seção 1.2, elucida-se a problemática da pesquisa, com foco no multicritério. Em sequência, listam-se os objetivos da investigação, na Seção 1.3. Ao final, os capítulos seguintes são descritos, na Seção 1.4.

1.1 Considerações iniciais

A participação do Brasil no Acordo de Paris, desde 2016, tem como objetivo a redução das emissões de gases do efeito estufa em níveis percentuais relativos a 2005. Atualmente, a meta consiste em redução aproximada de 48% em comparação ao ano-base, sendo cumulativa para 2030, em que se estipula 53% (BRASIL, 2023b). Tais projeções são ambiciosas, envolvendo a participação conjunta da economia e da sociedade.

Em 2023, segundo a análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil realizada pelo Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), três setores foram responsáveis por 92% das emissões totais (SEEG, 2024): Mudanças do Uso da Terra e Agropecuária, ambos somando 74% e englobando as atividades de desmatamento, gestão dos ruminantes, processo de produção agrícola e utilização de fertilizantes nitrogenados, cujos principais agentes poluentes são CO_2, NH_4 e N_2O; e Energia, representando 18% e elencando as atividades de produção, transformação, transporte e consumo de energia, como queimadas de combustíveis e emissões fugitivas da indústria do petróleo, sendo majoritariamente de CO_2. Nos setores avaliados, verifica-se a oportunidade da implementação de estratégias renováveis, de forma a mitigar significativa parcela das emissões.

Nesse cenário, o H_2V, ou hidrogênio renovável, surge como uma alternativa limpa às variantes oriundas de hidrocarbonetos, comumente utilizadas nos setores agrícola e energético, na fabricação de fertilizantes e aço, como exemplos. Ademais, o H_2V é produzido pela eletrólise da água, cujo fornecimento de energia ao processo é proveniente de conversões renováveis, como solar fotovoltaica e eólica.

Uma promissora implementação dessa tecnologia consiste na estratégia *power-to-gas*, em que o excedente de energia elétrica convertida por meio de processos renováveis é destinado à produção de H_2V, sendo distribuído ao consumidor final por uma cadeia logística, ou utilizado em processos secundários de conversão (GORAJ *et al.*, 2023). Com isso, diversos

produtos alternativos podem ser obtidos, como exemplos, o aço verde, a amônia renovável e a gordura hidrogenada. Em adição, o H_2V pode ser implementado no armazenamento de energia em larga escala por compressão, criogenia ou meios geológicos, como reservatórios esgotados de gás natural (HASSAN *et al.*, 2021; MORADI; GROTH, 2019).

No contexto brasileiro de transição energética, existe potencial de aplicação do H_2V no setor agrícola, para produção de fertilizantes a base de amônia verde; já no setor energético, sua implementação dá-se como alternativa ao carvão na indústria de aço, combustível para transportes alternativos, vetor de energia mitigando a intermitência das energias renováveis, dentre outras aplicações. Com isso, espera-se estimular o crescimento da indústria, tendo em vista o potencial de produção nacional.

Segundo as metas estabelecidas pelo Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2), o país tem potencial de tornar-se referência na obtenção de H_2V, estimando-se produção anual de 1,8 Gt e estabelecimento, até 2030, de *hubs* de hidrogênio renovável em todas as regiões (BRASIL, 2023a). Ademais, projeta-se aumentar em sete vezes o investimento anual em recursos públicos destinados para o desenvolvimento do setor. No Nordeste, atualmente destaca-se o *hub* do complexo Pecém, possuindo 30 acordos com empresas nacionais e internacionais para investimento no setor, com foco na exportação ao Porto de Roterdã e a países como China, Coreia do Sul e Japão (SDE, 2024; PECÉM, 2023).

1.2 Problemática e justificativa

O destaque na produção de larga escala e exportação do H_2V deve ser particionado, de forma a incluir essa tecnologia no mercado interno, fomentando o desenvolvimento da indústria, promovendo estratégias de transição energética eficazes e estimulando a produção científica nacional. Tais pontos contribuem para o cumprimento dos objetivos do Acordo de Paris e alinham-se com as estratégias do PNH2. Todavia, para que isso seja possível, o H_2V produzido localmente deve chegar ao consumidor final de forma segura, por meio de uma logística de distribuição adequada. Para tal, torna-se necessária a estruturação do problema em questão, objetivando a apuração das variáveis pertinentes ao transporte desse produto, e a avaliação das opções disponíveis, de forma a selecionar a mais viável.

Nesse contexto, os Métodos de Estruturação de Problema (MEP) são abordagens qualitativas para decisões difíceis de serem modeladas (JUNIOR; SCHRAMM, 2022). Por meio de sua aplicação, realiza-se a elicitação das variáveis do problema, do ponto de vista de um ou

mais decisores. Portanto, configuram-se como etapa preliminar da tomada de decisão.

No âmbito da logística do H_2V, comumente utiliza-se de uma *Multi-Criteria Decision-Analysis* / Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA) para avaliar um conjunto de alternativas disponíveis em relação a múltiplos critérios, ou atributos, podendo haver participação de diversos decisores, com interesses conflitantes entre si. Devido à integração humana no processo, pode-se complementar essa abordagem com os conceitos dos conjuntos *fuzzy*, de forma a considerar a incerteza, ou hesitação, das informações fornecidas pelos decisores. Assim, na área multicritério *fuzzy* aplicada à logística do H_2V, verifica-se significativa quantidade de publicações, principalmente no tocante à produção e ao armazenamento desse produto, conforme abordado por Acar *et al.* (2018), Deveci (2018), Lewandowska-Śmierzchalska *et al.* (2018), Abdel-Basset *et al.* (2021), Zhao *et al.* (2022), Das *et al.* (2023) e diversos outros autores. Em relação à logística de transporte, são habitualmente estudados temas voltados à seleção de tecnologia para veículos renováveis (SAXENA; YADAV, 2023; PAMUCAR *et al.*, 2021b; JALLER; OTAY, 2020) e à escolha de combustível para transporte urbano (PAMUCAR *et al.*, 2021a) e marítimo (REN; LIANG, 2017).

Apesar das contribuições existentes, não é relatada na literatura uma avaliação da distribuição de H_2V por meio de uma abordagem conjunta de lógica *fuzzy* esférica com MCDA de sobreclassificação. Ademais, a etapa de implementação do MEP não é especificada em estudos anteriores. Especificamente, uma análise dos modos de transporte do H_2V com o uso do modelo PROMETHEE II *fuzzy* esférico, com aplicação preliminar do MEP *Value-Focused Thinking* (VFT), não é citada em duas revisões de literatura recentes sobre o estado da arte de MCDA no setor de transporte (YANNIS *et al.*, 2020) e sobre as oportunidades e desafios de transformar o transporte de carga de combustível fóssil para um baseado em hidrogênio (WANNIARACHCHI *et al.*, 2023).

Assim, esta pesquisa se destinou à proposta de um modelo de decisão, considerando o fator hesitante das opiniões humanas e objetivando ordenar as alternativas de transporte disponíveis, selecionando a mais viável no contexto nacional da logística de distribuição do H_2V. Dessa forma, visa-se a uma contribuição à área multicritério, de forma a instigar futuras investigações e prover um método aplicável em potenciais empreitadas de decisores.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é selecionar o modo de transporte de hidrogênio verde mais viável para abastecer o mercado brasileiro, por meio do desenvolvimento e aplicação de um modelo de decisão baseado no PROMETHEE integrado a conjuntos *fuzzy* esféricos.

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos do estudo, destacam-se:

1. Realizar uma entrevista com um especialista na área de H_2V, aplicando VFT para definição da problemática da pesquisa, das alternativas e dos critérios do problema de decisão.
2. Estudar cenários de distribuição nacional de H_2V, visando avaliar a seleção de um modo de transporte a depender da localização do consumidor.
3. Por meio da aplicação de um questionário: apurar o desempenho das alternativas em relação aos critérios; e atribuir níveis de importância aos critérios, para cada caso analisado.
4. Desenvolver um modelo PROMETHEE II *fuzzy* esférico para o alcance dos resultados.
5. Validar o modelo proposto a partir da análise de sensibilidade.

1.4 Estrutura da Dissertação

Organiza-se a dissertação em capítulos, que são apresentados a seguir.

No Capítulo 2, realiza-se a revisão de literatura das MCDAs aplicadas em estudos de transporte do H_2V. Para tal, inicialmente define-se a busca dos documentos na base SCOPUS, seguidos dos critérios de seleção dos artigos que, na sequência, são analisados em conteúdo. Com isso, justifica-se a escolha da MCDA utilizada na dissertação. Ao final do capítulo, os conjuntos *fuzzy* esféricos são discutidos.

No Capítulo 3, apresenta-se o detalhamento da metodologia aplicada, englobando: a elicitação da problemática da pesquisa, das alternativas e dos critérios pela implementação do VFT; a definição dos cenários de distribuição; a atribuição de níveis de importância sob ótica *fuzzy* esférica; e o desenvolvimento do PROMETHEE II *fuzzy* esférico. No Capítulo 4, por sua vez, discutem-se os resultados da investigação pela aplicação do modelo proposto, compreendendo o ranqueamento das alternativas de transporte e a análise de sensibilidade.

Por fim, a síntese do conhecimento obtido durante a elaboração da dissertação e as sugestões de aperfeiçoamentos ao método empregado são apresentadas no Capítulo 5.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, realiza-se uma revisão sistemática de literatura a respeito do tema abordado. Na Seção 2.1, apresenta-se a definição dos mecanismos de pesquisa da investigação, a produção científica anual de documentos relacionados ao tema e a análise dos artigos selecionados, contemplando o apurado de suas metodologias e identificando abordagens comuns entre eles. Na Seção 2.2, explicam-se conceitos fundamentais sobre conjuntos *fuzzy* esféricos.

2.1 Análise das publicações

Para apuração de documentos relevantes à investigação, utilizou-se da base de dados SCOPUS (Elsevier). No dia 07 de novembro de 2024, definiu-se a *string* de busca dos artigos com foco no transporte de H_2V, conforme apresentado no Quadro 1 (ELSEVIER, 2023).

Quadro 1 – *String* original e quantidade de publicações associadas

String de busca	Nº de publicações
TITLE-ABS-KEY ((“*green hydrogen*” OR *hydrogen*) AND (mcda OR *multicriteria* OR mcdm OR *multi-criteria*) AND (*transport** OR “*transport* logistics*” OR “*freight transport**” OR “*distribution logistics*”))	97

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme exposto no Quadro 1, na primeira instância da *string* encontra-se o objeto de estudo, que é o H_2V. Nota-se o uso conjunto do termo próprio em inglês, *green hydrogen*, e da palavra única hidrogênio, *hydrogen*. Isso ocorre pois mesmo que H_2V não seja citado nos campos analisados, pode-se fazer uso do termo “renovável” na publicação, logo aplicando-se ao objeto de estudo em questão; na segunda instância, analisam-se as metodologias empregadas, que são MCDA, *Multi-Criteria Decision-Making* / Metodologia Multicritério de Tomada de Decisão (MCDM) e multicritério, *multicriteria* ou *multi-criteria* em inglês, de forma a diversificar os documentos; já na última, investigam-se as palavras-chave relacionadas à logística de distribuição, tais quais *transport**, cujo asterisco possibilita integrar-se variantes como *transportation*, *transport* logistics*, *freight transport* (do inglês, transporte de carga) e *distribution logistics* (do inglês, logística de distribuição).

A partir de uma análise preliminar da *string* original, identificaram-se alguns artigos em temas estritamente não correlatos, tais quais estudos em áreas da biologia (como exemplos, fermentação bacterial e produção enzimática de açúcar), otimização de processos e aplicações de programação linear inteira mista. Portanto, suas respectivas palavras-chave, em inglês, foram

suprimidas com o uso do operador AND NOT. Adicionalmente, por meio de uma análise de documentos em cada área, campos de estudo não relacionados foram excluídos, incluindo: "Ciências agriculturais e biológicas" (AGRI), "Multidisciplinar" (MULT), "Ciências da Terra e planetárias" (EART), "Economia, econometria e finanças" (ECON), "Engenharia química" (CENG) e "Matemática" (MATH). Dessa forma, compila-se a *string* refinada no Quadro 2.

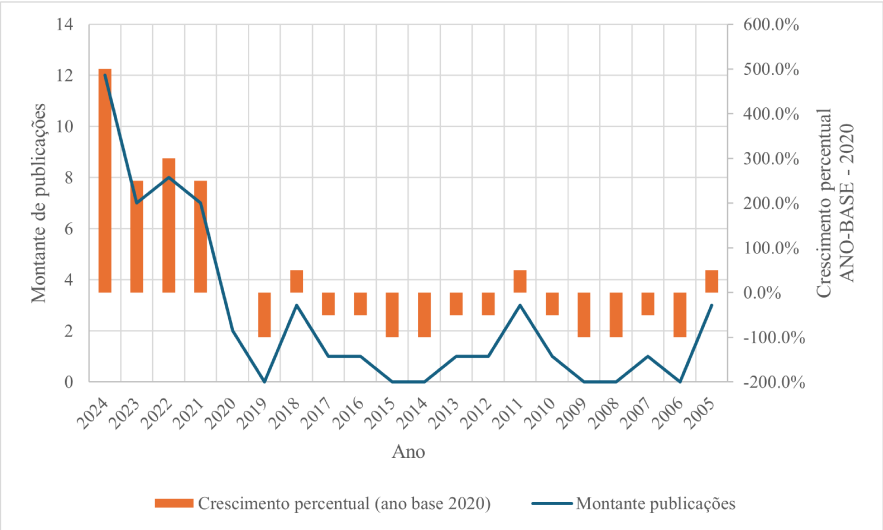
Quadro 2 – *String* refinada e quantidade de publicações associadas

String de busca	Nº de publicações
TITLE-ABS-KEY (("*green hydrogen*" OR *hydrogen*) AND (mcda OR *multicriteria* OR mcdm OR *multi-criteria*) AND (*transport** OR "*transport* logistics*" OR "*freight transport**" OR "*distribution logistics*") AND NOT (*biology* OR *ferment** OR *enzymatic*) AND NOT (*optimization* OR "*mixed-integer linear program**")) AND (EXCLUDE (SUBJAREA, "AGRI") OR EXCLUDE (SUBJAREA, "MULT") OR EXCLUDE (SUBJAREA, "EART") OR EXCLUDE (SUBJAREA, "ECON") OR EXCLUDE (SUBJAREA, "CENG") OR EXCLUDE (SUBJAREA, "MATH"))	51

Fonte: Elaborado pelo autor

As publicações representadas pela *string* refinada encontram-se entre 2005 e 2024, conforme ilustrado na Figura 1. Nela, verifica-se tendência de crescimento na produção de documentos a partir de 2020, sendo este o ano-base da análise. Apesar do considerável aumento percentual de 250% entre 2020 e 2021, os dois anos seguintes se configuraram por estabilidade na produção científica acerca do tema. Todavia, até novembro de 2024, identifica-se 500% de aumento em relação ao ano-base e 71% em comparação ao ano anterior. Logo, há tendência de crescimento das pesquisas na área de métodos multicritério aplicados ao transporte de H_2V, contribuindo para sua relevância no meio científico.

Figura 1 – Número de publicações contidas na *string* refinada entre 2005 e 2024



Fonte: Elaborado pelo autor

Visando avaliar o estado da arte especificamente sobre o estudo multicritério do transporte de hidrogênio, filtraram-se os artigos da *string* refinada por meio de uma análise de temática, em cada documento. Ao verificar título, resumo, palavras-chave, introdução, métodos e conclusões, buscou-se suprimir quaisquer publicações não relacionadas estritamente ao tema que não haviam sido eliminadas no refinamento da *string* original. Portanto, possibilitou-se excluir documentos cujas abordagens consistem no foco exclusivo nas etapas de produção e armazenamento do H_2V, como estudos de seleção geográfica de unidades geradoras, e na escolha do tipo de combustível, ou tecnologia embarcada, para transporte urbano, de carga e marítimo.

Na Tabela 1, apresentam-se os artigos selecionados em ordem cronológica inversa, compilando seus objetivos, métodos empregados, critérios e resultados. Na avaliação dos atributos, citam-se as dimensões as quais pertencem, sendo elas técnica (Tec.), econômica (Econ.), de risco (Ris.), ambiental (Amb.) e social (Soc.).

Tabela 1 – Revisão dos estudos anteriores acerca do transporte de H_2V

Referência	Objetivo do estudo	Métodos	Dimensão dos critérios					Resultados
			Tec.	Econ.	Ris.	Amb.	Soc.	
Manafzadeh *et al.* (2024)	Uma análise da cadeia de suprimentos de hidrogênio em dois cenários, no Irã: consumo doméstico e exportação. Para a produção de hidrogênio, gás natural e energia solar foram considerados como as fontes principais, com *Steam Methane Reforming* / Reforma a Vapor de Metano (SMR) e eletrólise como técnicas de produção. Para armazenamento, foram selecionadas compressão e liquefação de hidrogênio, incluindo *Liquid Organic Hydrogen Carrier* / Portador de Hidrogênio Orgânico Líquido (LOHC). Para o transporte, foram listados caminhões, navios e gasodutos de gás natural.	*Analytic Hierarchy Process* (AHP), AHP-*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) e AHP-*VIekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje* (VIKOR).	✓	✓	-	✓	✓	No cenário de consumo doméstico, o conjunto SMR, LOHC e gasoduto configurou-se como solução ótima. Todavia, na situação de exportação isso se alterou para H_2V, hidrogênio liquefeito e transporte por navios.

Referência	Objetivo do estudo	Métodos	Dimensão dos critérios					Resultados
			Tec.	Econ.	Ris.	Amb.	Soc.	
Kumar *et al.* (2024)	O desenvolvimento de uma estrutura de decisão geográfica visando a seleção do local mais viável para produção *offshore* de H_2V na Austrália, com consideração da logística de distribuição do produto. Em cada local, diferentes modos de transporte estão disponíveis, como gasodutos já existentes e novos, além de transporte marítimo de H_2V liquefeito.	Ponderação Bayesiana híbrida *CRiteria Importance Through Inter-criteria Correlation* (CRITIC), Entropia, *MEthod based on the REmoval effects of Criteria* (MEREC) e *Measurement of Alternatives and Ranking according to COmpromise Solution* (MARCOS).	✓	✓	✓	✓	✓	Foi demonstrado melhor desempenho em todos critérios pelo transporte marítimo, caracterizando-se como solução mais adequada.
Wulf *et al.* (2023a)	A avaliação da distribuição de H_2V para a indústria de veículos com célula a combustível. Gasoduto e H_2V liquefeito, incluindo LOHC, consistiram nos modos analisados. Ademais, realizou-se uma comparação com veículos de combustão interna.	*Simple Multi Attribute Rating Technique* (SMART) e PROMETHEE.	-	✓	-	✓	✓	A combinação de veículo com célula a combustível e gasoduto compreendeu a alternativa mais viável, quando comparada a outros modos de transporte e ao veículo convencional à gasolina.
Oner e Khalilpour (2022)	A seleção de portadores de hidrogênio, incluindo circulares e LOHC, em três casos. Em um deles, analisou-se a distribuição marítima da Austrália ao Japão.	AHP-VIKOR e AHP-TOPSIS.	✓	✓	✓	✓	-	Tolueno, dibenzil tolueno e metano foram identificados como opções viáveis, no cenário de transporte.
Viana *et al.* (2022)	A categorização das seções em um gasoduto de hidrogênio a partir de um modelo multidimensional de risco. As dimensões analisadas foram humana, ambiental e financeira. Ademais, lidou-se com a incerteza estatística dos acidentes.	Teoria da Utilidade e *ÉLimination Et Choix Traduisant la REalité* (ELECTRE) TRI.	-	-	✓	-	-	Quatro de dez seções foram consideradas de alto risco, grande parcela em áreas residenciais, enquanto que se atribuíram, respectivamente, médio e baixo riscos a uma, correspondente à seção agrícola, e cinco áreas, compreendendo setores residenciais e industriais.

Referência	Objetivo do estudo	Métodos	Dimensão dos critérios					Resultados
			Tec.	Econ.	Ris.	Amb.	Soc.	
Iordache *et al.* (2022)	O desenvolvimento de um modelo de decisão *fuzzy* objetivando a análise do transporte de hidrogênio por meio de gasodutos, na Romênia. Foram consideradas como alternativas: a conversão básica da rede de gasoduto atual para uma mistura de gás natural e hidrogênio; a conversão gradual para uma rede exclusiva de hidrogênio; a conversão parcial para subsistemas; e a construção de uma nova rede de gasoduto exclusiva para hidrogênio.	*Interval rough Dombi* MARCOS.	✓	✓	✓	✓	-	Indicou-se nos resultados a primeira alternativa, mistura de gases, como a melhor opção disponível, alinhando-se a tendências europeias atuais. Ao analisar-se as preferências dos decisores, provou-se como mais importante, em curto prazo, o critério na dimensão econômica.
Medeiros *et al.* (2016)	Uma análise de riscos multidimensional em relação ao transporte de hidrogênio por gasoduto, com foco na análise de sensibilidade. Assim, buscou-se aferir como a incerteza na determinação dos parâmetros influenciava a estimação de risco.	*Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT) e Monte Carlo.	-	-	✓	-	-	Atestou-se o modelo como efetivo em mitigar riscos, já que se demonstrou, na análise de sensibilidade, significativa robustez quando incertezas estão próximas a 5%.
Lins e Almeida (2012)	A proposta de um um modelo multicritério para avaliação de riscos em seções genéricas de gasoduto de hidrogênio. Adicionalmente, identificaram-se os parâmetros mais impactantes na análise.	MAUT.	-	-	✓	-	-	Nos resultados, mostrou-se uma ordem decrescente de seções em que recursos devem ser aplicados para mitigar riscos. Ademais, foram provados como mais importantes os parâmetros técnicos de pressão de operação e diâmetro da tubulação; em contraste, o comprimento da seção foi considerado irrelevante no estudo dos riscos, mas significante em uma hipotética perda financeira.

Referência	Objetivo do estudo	Métodos	Dimensão dos critérios					Resultados
			Tec.	Econ.	Ris.	Amb.	Soc.	
Alencar e Almeida (2010)	O desenvolvimento de um modelo multidimensional de riscos de gasoduto inovador, à época da pesquisa. Foi o primeiro, na área de hidrogênio, a considerar as três dimensões de risco supracitadas.	MAUT.	-	-	✓	-	-	Nos resultados, mostrou-se que as seções cujo risco é elevado devem ter prioridade na alocação de recursos.

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme ilustrado na Tabela 1, em nenhum dos artigos supracitados há especificação da fase de implementação de MEP. Consequentemente, uma abordagem comum às pesquisas passadas consiste em uma revisão de literatura para elicitar as alternativas e os critérios, com subsequente consulta a decisores para atribuir Fatores de Escala (FE). Considerando que os parâmetros decisórios são definidos pelas preferências dos decisores (ENSSLIN *et al.*, 2001), o modelo orientado ao VFT da investigação constitui um avanço em relação aos estudos anteriores.

No tocante à análise das alternativas, em iniciativas *offshore*, o transporte marítimo é definido como modo mais viável (MANAFZADEH *et al.*, 2024; KUMAR *et al.*, 2024), enquanto que gasodutos adaptados de gás natural ou redes dedicadas ao hidrogênio consistem nos métodos de distribuição mais seguros e econômicos em aplicações *onshore* (MANAFZADEH *et al.*, 2024; WULF *et al.*, 2023a). Em relação aos critérios, o tipo mais recorrente encontra-se na dimensão de risco, sendo empregado em sete artigos, seguido dos atributos econômico e ambiental, cada um com cinco ocorrências; na sequência, tem-se as dimensões técnica e social, com quatro e três aparições, respectivamente.

A partir da análise da Tabela 1, torna-se possível a identificação das seguintes temáticas de pesquisa, estudadas individualmente ou em combinação: distribuição de hidrogênio liquefeito ou comprimido e LOHC por meio do transporte de carga (MANAFZADEH *et al.*, 2024; WULF *et al.*, 2023a); avaliação do transporte marítimo como modo de distribuição, predefinido ou selecionável (MANAFZADEH *et al.*, 2024; KUMAR *et al.*, 2024; ONER; KHALILPOUR, 2022); e suprimento de hidrogênio por gasoduto, com foco na escolha do modo mais viável (MANAFZADEH *et al.*, 2024; KUMAR *et al.*, 2024; WULF *et al.*, 2023a), na seleção do tipo de gasoduto baseado em mistura de gases (IORDACHE *et al.*, 2022), ou na categorização de seções em função do risco (VIANA *et al.*, 2022; MEDEIROS *et al.*, 2016; LINS; ALMEIDA, 2012; ALENCAR; ALMEIDA, 2010). De fato, em nenhum dos documentos se analisa o H_2V como produto a ser transportado em nível nacional, considerando tanto transporte rodoviário com H_2V

comprimido ou liquefeito, quanto subterrâneo a partir de gasodutos adaptados de gás natural.

Em relação ao uso de MCDA com apuração da hesitação humana, verificam-se dois artigos: em um, aplica-se a Entropia (KUMAR *et al.*, 2024); no outro, conjuntos *interval rough* (IORDACHE *et al.*, 2022). Todavia, no contexto explorado, não é verificada a implementação do estado da arte em lógica *fuzzy*, ou seja, dos conjuntos *fuzzy* esféricos (OZCEYLAN *et al.*, 2022). Ademais, estuda-se na literatura a distribuição de H_2V por meio do PROMETHEE, porém sem consideração da incerteza (WULF *et al.*, 2023b). Em adição, tal família de MCDA de sobreclassificação é comumente usada na logística de transporte, principalmente ao lidar-se com considerável incerteza e conjuntos de dados mistos, qualitativos e quantitativos (YANNIS *et al.*, 2020). Portanto, uma lacuna na pesquisa existente é destacada pela revisão de literatura, pois métodos de ponta, como conjuntos *fuzzy* esféricos, ainda não foram integrados ao PROMETHEE, no contexto específico da investigação. Dada a natureza de alto risco do transporte de H_2V na tomada de decisão, incorpora-se a lógica *fuzzy* esférica ao PROMETHEE para melhor captar essas incertezas. Promove-se uma discussão sobre conjuntos *fuzzy* esféricos na Seção 2.2.

2.2 Conceitos sobre conjuntos *fuzzy* esféricos

Desde sua criação, em 1965, o principal objetivo das abordagens *fuzzy* é capturar a imprecisão do pensamento humano através de operações matemáticas (ZADEH, 1965). Com o passar dos anos, tais métodos foram aperfeiçoados para prover aos decisores maior domínio de suas preferências, recusas e hesitações a respeito de um objeto qualquer, u, pertencente a um universo do discurso, U (KAHRAMAN; GÜNDOĞDU, 2021). Assim, a teoria *fuzzy* esférica, que possibilita a apuração da imprecisão de informações objetivas e subjetivas fornecidas pelo decisor, foi introduzida por Gündoğdu e Kahraman (2019). Nela, define-se um conjunto *fuzzy* esférico $\tilde{A}_S$, segundo (2.1).

$$\tilde{A}_S = \left\{ \left\langle u,\ [\mu_{\tilde{A}_S}(u);\ \upsilon_{\tilde{A}_S}(u);\ \pi_{\tilde{A}_S}(u)] \right| u\ \in\ U \right\} \tag{2.1}$$

Tal que $\mu_{\tilde{A}_S} : U \to [0,1]$, $\upsilon_{\tilde{A}_S} : U \to [0,1]$, $\pi_{\tilde{A}_S} : U \to [0,1]$ e $0 \leq \mu^2_{\tilde{A}_S}(u) + \upsilon^2_{\tilde{A}_S}(u) + \pi^2_{\tilde{A}_S}(u) \leq 1\ \forall u \in U$ (GÜNDOĞDU; KAHRAMAN, 2019).

Para cada u, podendo esse objeto ser alternativas e critérios de um procedimento de apoio à decisão, os números $\mu_{\tilde{A}_S}$, $\upsilon_{\tilde{A}_S}$ e $\pi_{\tilde{A}_S}$ são os graus de afiliação, não-afiliação e hesitação de u para $\tilde{A}_S$, respectivamente. Seus valores variam entre 0 e 1, sendo definidos independentemente

entre si (KAHRAMAN; GÜNDOĞDU, 2021; GÜNDOĞDU; KAHRAMAN, 2019).

2.2.1 Operações matemáticas

Considerando dois conjuntos $\tilde{A}_S$ e $\tilde{B}_S$ definidos conforme (2.1), as operações de adição, multiplicação e multiplicação por escalar ($\lambda > 0$) são listadas a seguir (GÜNDOĞDU; KAHRAMAN, 2019). Destaca-se que a subtração entre conjuntos é indefinida na lógica *fuzzy* esférica.

Adição:

$$\tilde{A}_S \oplus \tilde{B}_S = \left\{ \sqrt{\mu^2_{\tilde{A}_S} + \mu^2_{\tilde{B}_S} - \mu^2_{\tilde{A}_S}\mu^2_{\tilde{B}_S}};\ \upsilon_{\tilde{A}_S}\upsilon_{\tilde{B}_S};\ \sqrt{\left(1-\mu^2_{\tilde{B}_S}\right)\pi^2_{\tilde{A}_S} + \left(1-\mu^2_{\tilde{A}_S}\right)\pi^2_{\tilde{B}_S} - \pi^2_{\tilde{A}_S}\pi^2_{\tilde{B}_S}} \right\} \tag{2.2}$$

Multiplicação:

$$\tilde{A}_S \otimes \tilde{B}_S = \left\{ \mu_{\tilde{A}_S}\mu_{\tilde{B}_S};\ \sqrt{\upsilon^2_{\tilde{A}_S} + \upsilon^2_{\tilde{B}_S} - \upsilon^2_{\tilde{A}_S}\upsilon^2_{\tilde{B}_S}};\ \sqrt{\left(1-\upsilon^2_{\tilde{B}_S}\right)\pi^2_{\tilde{A}_S} + \left(1-\upsilon^2_{\tilde{A}_S}\right)\pi^2_{\tilde{B}_S} - \pi^2_{\tilde{A}_S}\pi^2_{\tilde{B}_S}} \right\} \tag{2.3}$$

Multiplicação por um escalar:

$$\lambda \cdot \tilde{A}_S = \left\{ \sqrt{1-\left(1-\mu^2_{\tilde{A}_S}\right)^{\lambda}};\ \upsilon^{\lambda}_{\tilde{A}_S};\ \sqrt{\left(1-\mu^2_{\tilde{A}_S}\right)^{\lambda} - \left(1-\mu^2_{\tilde{A}_S} - \pi^2_{\tilde{A}_S}\right)^{\lambda}} \right\} \tag{2.4}$$

Para uma coleção finita de conjuntos *fuzzy*, a operação *Spherical Weighted Arithmetic Mean* / Média aritmética esférica ponderada (SWAM) pode ser implementada para agregá-los, conforme apresentado na Equação 2.5. Para tal, utilizam-se d pesos na forma ψ_a, um para cada conjunto, em que $a = \{1, 2, \ldots, d\}$ e $\sum_{a=1}^{d} \psi_a = 1$ (GÜNDOĞDU; KAHRAMAN, 2019).

$$\begin{aligned} SWAM(\tilde{A}_{S1},\ \tilde{A}_{S2},\ \ldots,\ \tilde{A}_{Sd}) &= \psi_1\tilde{A}_{S1} + \psi_2\tilde{A}_{S2} + \ \ldots\ + \psi_d\tilde{A}_{Sd} \\ = \left\{ \sqrt{1-\prod_{a=1}^{d}(1-\mu^2_{\tilde{A}_{Sa}})^{\psi_a}};\ \prod_{a=1}^{d}\upsilon^{\psi_a}_{\tilde{A}_{Sa}};\ \sqrt{\prod_{a=1}^{d}(1-\mu^2_{\tilde{A}_{Sa}})^{\psi_a} - \prod_{a=1}^{d}(1-\mu^2_{\tilde{A}_{Sa}} - \pi^2_{\tilde{A}_{Sa}})^{\psi_a}} \right\} \end{aligned} \tag{2.5}$$

Para transformar os conjuntos *fuzzy* esféricos em valores nítidos, utilizam-se as funções pontuação (do inglês *score*) e acurácia (do inglês *accuracy*). Suas definições para $\tilde{A}_S$ são expostas nas Equações (2.6) e (2.7), respectivamente (GÜNDOĞDU; KAHRAMAN, 2019).

$$\mathbf{S}(\tilde{A}_S) = \left(\mu_{\tilde{A}_S} - \pi_{\tilde{A}_S}\right)^2 - \left(\upsilon_{\tilde{A}_S} - \pi_{\tilde{A}_S}\right)^2 \tag{2.6}$$

$$\mathbf{A}(\tilde{A}_S) = \mu^2_{\tilde{A}_S} + \upsilon^2_{\tilde{A}_S} + \pi^2_{\tilde{A}_S} \tag{2.7}$$

De tal forma que $\tilde{A}_S < \tilde{B}_S$ se e somente se:

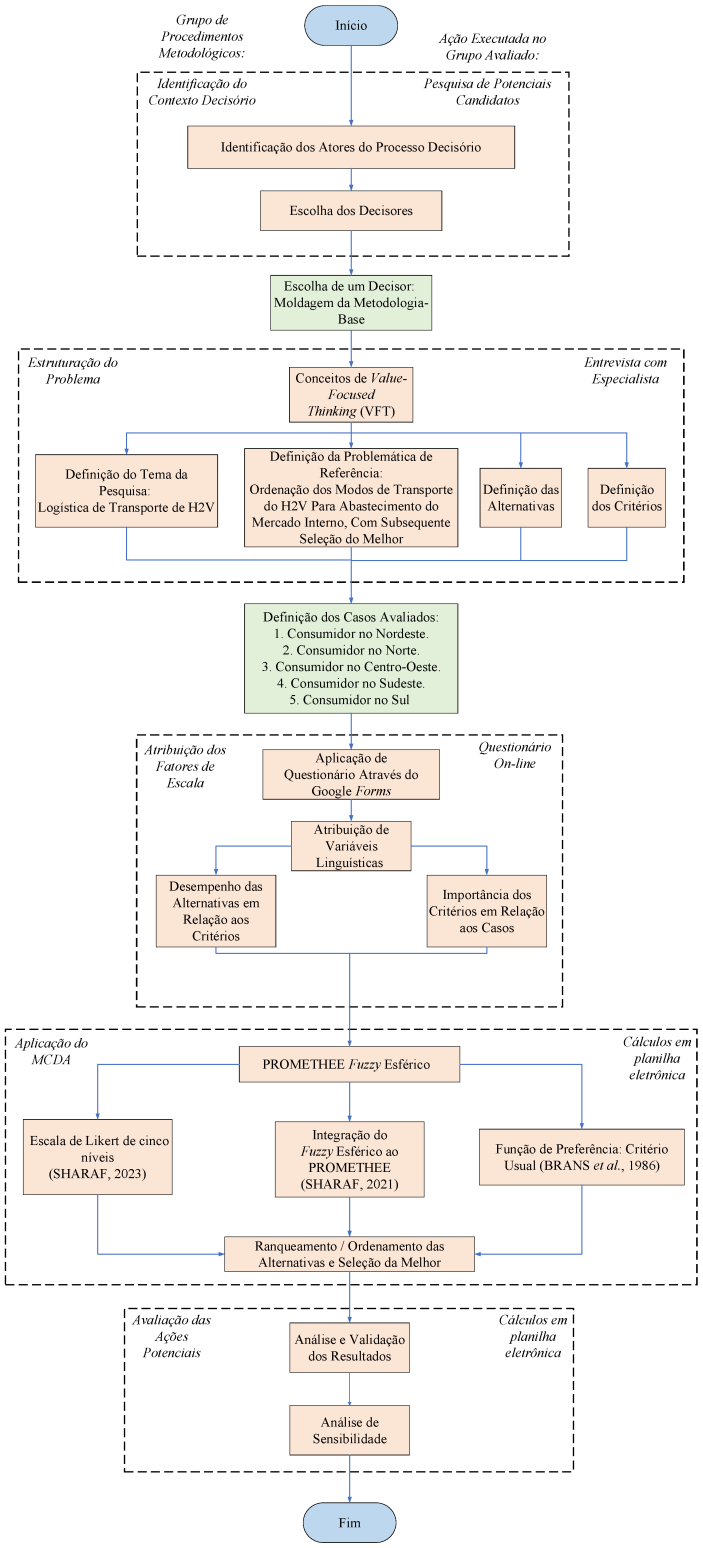
1. $\mathbf{S}(\tilde{A}_S) < \mathbf{S}(\tilde{B}_S)$ ou;
2. $\mathbf{S}(\tilde{A}_S) = \mathbf{S}(\tilde{B}_S)$ e $\mathbf{A}(\tilde{A}_S) < \mathbf{A}(\tilde{B}_S)$.

Por fim, utilizam-se tais operações matemáticas para modelar o método PROMETHEE II *fuzzy* esférico, conforme é exposto na Seção 3.4.

3 METODOLOGIA

Na Figura 2, são apresentadas as fases do modelo aplicado na investigação. As seções seguintes são destinadas ao detalhamento dessas etapas.

Figura 2 – Fluxograma do modelo utilizado



Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo é constituído de dois momentos distintos: a participação de um decisor especialista em H_2V, compreendendo a etapa "Estruturação do Problema"; e a consulta de múltiplos indivíduos, com subsequente recorte dos experientes na área, para definição da matriz de decisão, ou de consequências, e do nível de importância dos critérios. Este último momento se caracteriza como uma pesquisa de opinião e se integra na etapa "Atribuição dos Fatores de Escala".

Isso se dá devido à natureza de apoio à decisão do modelo. Inicialmente, somente um decisor experiente é necessário para a elicitação do problema e dos parâmetros que o definem, de tal forma que uma comparação com a literatura é conduzida para validar as variáveis sugeridas. Na etapa de avaliação do desempenho das alternativas e da importância dos critérios, que é imprescindível para a posterior seleção do modo de transporte viável, pode-se recorrer a uma abordagem de decisão em grupo, tornando o modelo o mais próximo possível do ambiente empresarial em que tais decisões são comumente tomadas.

Portanto, propõe-se uma modelagem quantitativa empírica normativa: quantitativa pois se utiliza de uma MCDA para obtenção dos resultados; empírica pois os dados fornecidos são baseados nas experiências individuais dos decisores; e normativa, uma vez que se busca recomendar uma solução ótima para um problema novo, visando o fornecimento de orientações práticas para a tomada de decisão (BERTRAND; FRANSOO, 2002).

3.1 Identificação do contexto decisório

O processo de identificação do contexto decisório ocorreu através do contato com empresas brasileiras que assinaram o memorando de entendimento com o Governo do Estado do Ceará, para criação de um *hub* de H_2V (QUINTELA, 2022). Nesse estágio inicial do modelo, foi necessária a participação de um especialista de H_2V, visando o estabelecimento de uma base sólida à pesquisa. Com isso, escolheu-se um decisor. Devido a questões de sigilo industrial, a identificação das empresas contatadas e a identidade do decisor não podem ser fornecidas. Com sua participação, possibilitou-se identificar e estruturar o problema em questão, segundo discorrido na Seção 3.2.

3.2 Estruturação do problema

Para estruturação do problema, realiza-se uma entrevista com o decisor selecionado, de forma a se aplicar conceitos de VFT. Inicialmente, apresentam-se questões de ordem geral para a ambientação do decisor e a definição do rótulo do problema, tais quais:

1. Qual sua visão sobre o mercado de hidrogênio verde no Estado do Ceará ou, de uma forma mais ampla, no Brasil? Quais as tendências do mercado, em termos da logística dos processos de produção, armazenamento e transporte dessa forma do hidrogênio?
2. Qual sua visão sobre o estado de maturação dessa tecnologia no Brasil?
3. Em relação à logística, quais são os problemas que hoje se enfrentam no contexto nacional?
4. Desses problemas, qual você colocaria em prioridade e qual o critério que você utiliza para defini-la?

Dessa forma, o tema da pesquisa é definido na área da logística de transporte de H_2V, a problemática de referência é de ordenação, com subsequente seleção da alternativa de melhor desempenho, e o rótulo do problema estudado consiste em "ordenação e seleção dos modos de transporte do H_2V para abastecimento do mercado interno".

Em seguida, as alternativas, ou opções que envolvem o contexto decisório são definidas pelo decisor. Tal processo é explicitado naturalmente durante a entrevista, imediatamente após a nomeação do rótulo. Nesse caso, três alternativas são consideradas, conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Alternativas do modelo

Alternativas	Descrição
A_1	Transporte por meio de gasoduto de gás natural adaptado
A_2	Transporte por meio de caminhão, com H_2V comprimido
A_3	Transporte por meio de caminhão, com H_2V liquefeito

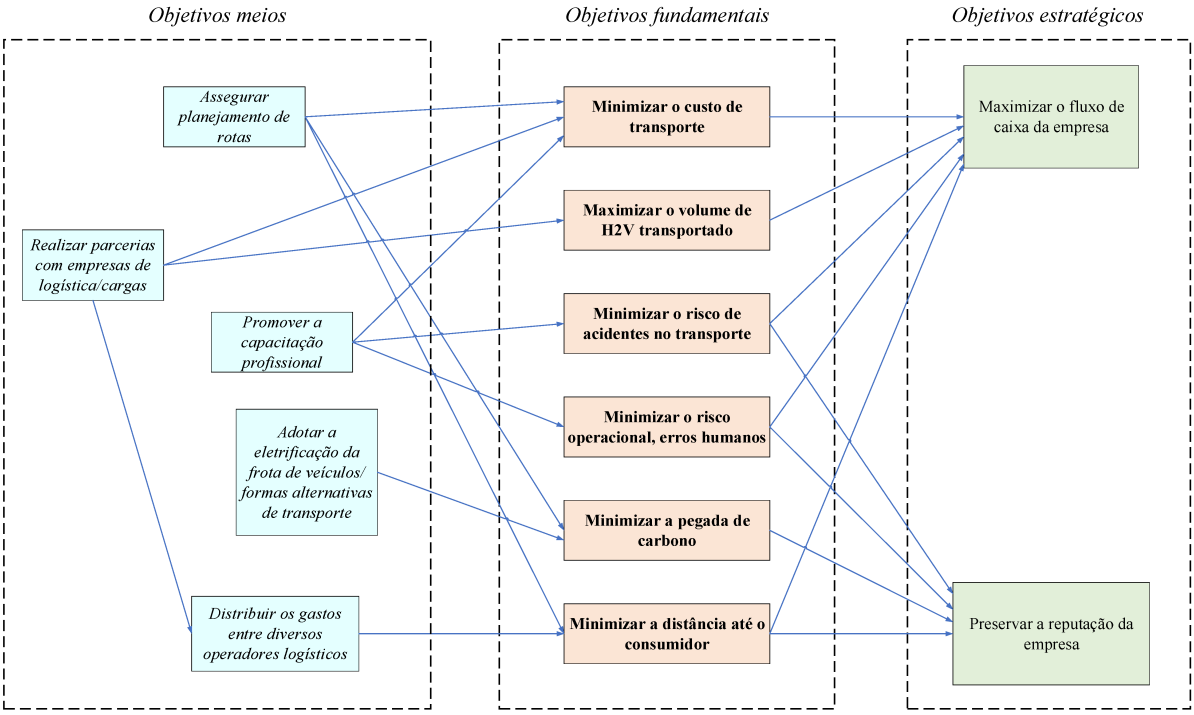
Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo exposto na Tabela 1, as alternativas propostas estão em consonância com a literatura existente sobre o tema.

Visando a definição dos critérios, isto é, os parâmetros de avaliação das alternativas, aplicam-se conceitos do VFT. Inicialmente, é realizado um apanhado de objetivos que o decisor considera como importantes no contexto decisório. Perguntas como "por que esse objetivo é importante?" avançam na hierarquia, em direção aos objetivos fundamentais, enquanto que questões do tipo "como alcançar esse objetivo?" retrocedem na hierarquia, em direção aos meios

(KEENEY *et al.*, 1994). Para simplificar o procedimento, de forma a otimizar o tempo limitado de entrevista disponibilizado pelo decisor, os objetivos fundamentais são considerados como critérios do modelo, pois expressam os valores finais do decisor para a tomada de decisão. Assim, o mapa da hierarquização dos objetivos está ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Mapa de objetivos meios, fundamentais e estratégicos da investigação



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 3, verificam-se cinco objetivos meios, que representam as ações possíveis de satisfazer os valores do decisor. Outrossim, existem seis objetivos fundamentais compondo os critérios do modelo, conforme descritos na Tabela 3. No topo da hierarquia, há ainda dois objetivos estratégicos correspondendo aos objetivos fundamentais amplos, para os quais as decisões a longo prazo da empresa são orientadas (KEENEY, 1996).

Tabela 3 – Critérios do modelo

Critério	Descrição	Objetivo
C_1	Custo de transporte	Minimizar
C_2	Volume de H_2V transportado	Maximizar
C_3	Risco de acidentes no transporte	Minimizar
C_4	Risco operacional (erros humanos no processo da logística)	Minimizar
C_5	Pegada de carbono	Minimizar
C_6	Distância até o consumidor	Minimizar

Fonte: Elaborado pelo autor

Os critérios propostos na Tabela 3 estão inseridos nas dimensões econômica (C_1), técnica (C_2 e C_6), de risco (C_3 e C_4) e ambiental (C_5). Dessa forma, são condizentes com a literatura, segundo ilustrado na Tabela 1.

3.2.1 Casos estudados

O problema é avaliado em cinco casos hipotéticos de demanda nacional, em todos eles a produção de H_2V ocorre no Porto do Pecém, Ceará. Em adição, cada caso possui duas suposições: existência e inexistência de rede de gasoduto até o consumidor final. A descrição dos casos é a seguinte:

- Caso NE: consumidor na região Nordeste, em um estado qualquer.
- Caso N: consumidor na região Norte, em um estado qualquer.
- Caso CO: consumidor na região Centro-Oeste, em um estado qualquer.
- Caso SE: consumidor na região Sudeste, em um estado qualquer.
- Caso S: consumidor na região Sul, em um estado qualquer.

Particularidades significantes na logística de transporte, quando o destino final é alterado, podem ser identificadas pelos cenários propostos. Ademais, a preferência pela rede de gasoduto, no caso de pronta disponibilidade desse modo de transporte, pode ser elucidada pelas suposições.

3.3 Atribuição dos fatores de escala: uma abordagem *fuzzy* esférica

Conforme ilustrado na Figura 2, a atribuição dos FE se dá através de um questionário, na plataforma Google Forms. No presente modelo *fuzzy*, os FE são definidos a partir de variáveis linguísticas, buscando reproduzir as nuances da opinião humana, assim facilitando a participação do decisor às custas de uma análise mais complexa (AKRAM *et al.*, 2023).

Nesta etapa, devido à proposta de tornar o modelo próximo ao ambiente de tomada de decisão empresarial e à natureza hipotética dos cenários estudados, torna-se necessária a obtenção de mais opiniões de especialistas, visando o melhor entendimento do problema. Assim, com o objetivo de expandir o espaço amostral de decisores, foram contatados diversos indivíduos por e-mail, solicitando a participação no questionário e o repasse do contato a potenciais interessados. Dessa forma, buscou-se gerar um efeito em cadeia.

No formulário, inicialmente os participantes devem informar local de trabalho, ou

estudo, e cargo atual, com opções divididas em quatro categorias: profissional na área de H_2V, professor de Instituição de Ensino Superior, aluno de Pós-Graduação (mestrado) e aluno de Pós-Graduação (doutorado). Em seguida, devem informar se possuem experiência na área (podendo ser contabilizada por cargos em empresas, participação em linhas de pesquisa correlatas, docência na área etc.) e, caso afirmativo, a quantidade de anos correspondentes. Por meio de tal abordagem, objetiva-se filtrar somente os decisores experientes na área e atribuir pesos às suas respectivas opiniões (ψ), para posterior agregação. Assim, na Equação (3.1) são definidos seus pesos individuais, ψ_a, com base nos anos de experiência com o H_2V. Conforme apresentado na Subseção 2.2.1, $a = \{1, 2, \ldots, d\}$, em que d representa o montante de decisores consultados.

$$\psi_a = \frac{\text{Experiência}_a}{\sum_{a=1}^{d} \text{Experiência}_a} \tag{3.1}$$

Na sequência, o desempenho das três alternativas do modelo (Tabela 2) deve ser avaliado pelos participantes em relação aos seis critérios definidos (Tabela 3) respondendo, assim, a três questões. Para isso, no método *fuzzy* esférico, uma escala verbal de Likert de cinco níveis pode ser utilizada, em que cada número, ou nota atribuída representa níveis específicos de indecisão. Nesta etapa, a pergunta "como o transporte através de X se sai / desempenha no critério Y?" deve ser respondida pelos decisores.

O questionário é conduzido de tal forma que critérios de custo, ou seja, aqueles cuja minimização é almejada (C_1 e C_3 a C_6, conforme presente na Tabela 3), são modelados como critérios benéficos, ou de maximização, como C_2. Isso ocorre devido ao tipo dos critérios, que são construídos, e à natureza das questões implementadas: deseja-se saber o desempenho do modo de transporte em relação ao objetivo de um dado critério. Como exemplo, um decisor é questionado sobre o desempenho de A_1 em relação à minimização de C_1; quanto maior a escala linguística utilizada, melhor é a alternativa em minimizar C_1, ou seja, menor será o custo do modo analisado. No caso de um critério benéfico, como C_2, quanto maior o conceito adotado pelo decisor, melhor o desempenho do modo em maximizar C_2, isto é, maior será o volume de H_2V transportado. Dessa forma, há uma relação diretamente proporcional entre a escala linguística e o desempenho da alternativa em um dado critério.

Os critérios, por sua vez, são classificados conforme importância: para cada caso especificado na Subseção 3.2.1, os seis critérios são avaliados por meio da escala de Likert de cinco níveis; como cada caso tem duas suposições, os decisores são confrontados com dez questões relativas à importância dos critérios. Assim, a pergunta "quão importante é o critério X

para a tomada de decisão no caso Y?" deve ser respondida pelos participantes. Novamente, há unificação de modelagem entre critérios de minimização e maximização. Portanto, compilam-se os termos linguísticos empregados e os conjuntos *fuzzy* esféricos associados na Tabela 4.

Tabela 4 – Variáveis linguísticas de classificação das alternativas e dos critérios

Termo linguístico (alternativas)	Termo linguístico (critérios)	Escala	Conjunto *fuzzy* esférico
Muito bom	Muito importante	5	{0,9; 0,1; 0,1}
Bom	Importante	4	{0,7; 0,3; 0,3}
Mediano	Média importância	3	{0,5; 0,5; 0,5}
Ruim	Importância abaixo da média	2	{0,3; 0,7; 0,3}
Muito ruim	Irrelevante	1	{0,1; 0,9; 0,1}

Fonte: Adaptado de Sharaf (2023)

3.4 Aplicação da MCDA: PROMETHEE II *fuzzy* esférico

A aplicação do PROMETHEE II, em que se lida com o ranqueamento completo das alternativas através de um fluxo líquido de sobreclassificação, integrado ao *fuzzy* esférico baseia-se nos trabalhos de Sharaf (2021), Gündoğdu e Kahraman (2019) e Brans *et al.* (1986). Considerando $A = \{A_1, A_2, \ldots, A_n\}$, $C = \{C_1, C_2, \ldots, C_m\}$ e $D = \{D_1, D_2, \ldots, D_d\}$ os conjuntos de n alternativas avaliadas, m critérios definidos e d decisores consultados, respectivamente. A sequência de etapas do método em questão é especificada a seguir e aplicada aos dez casos estudados.

1. Para cada decisor, são construídos a matriz de decisão (3.2) e o vetor de FE dos critérios (3.3) a partir das variáveis linguísticas utilizadas no questionário, conforme apresentado na Tabela 4. Ademais, define-se o vetor único dos pesos das opiniões dos decisores, Ψ, na Equação (3.4).

$$\tilde{\mathscr{D}}_{individual} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{1,1}^{ind} & \tilde{x}_{1,2}^{ind} & \ldots & \tilde{x}_{1,m}^{ind} \\ \tilde{x}_{2,1}^{ind} & \tilde{x}_{2,2}^{ind} & \ldots & \tilde{x}_{2,m}^{ind} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{n,1}^{ind} & \tilde{x}_{n,2}^{ind} & \ldots & \tilde{x}_{n,m}^{ind} \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

$$\tilde{\mathscr{W}}_{individual} = \begin{bmatrix} \tilde{w}_1^{ind} & \tilde{w}_2^{ind} & \ldots & \tilde{w}_m^{ind} \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \psi_1 & \psi_2 & \dots & \psi_d \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

Em (3.2), $\tilde{x}_{n,m}^{ind} = \{\mu_{\tilde{x}_{n,m}}^{ind};\ \upsilon_{\tilde{x}_{n,m}}^{ind};\ \pi_{\tilde{x}_{n,m}}^{ind}\}$ é o conjunto *fuzzy* esférico, na notação de elemento $\tilde{x}_{i,j} = \{\mu_{i,j};\ \upsilon_{i,j};\ \pi_{i,j}\}$ da matriz, correspondente à avaliação do desempenho da alternativa n em relação ao critério m, para um decisor, conforme é indicado no sobrescrito *ind*, derivado de "individual". No problema de decisão avaliado, as alternativas são representadas pelo índice i, tal que $i = \{1,2,3\}$; enquanto os critérios, $j = \{1,2,3,4,5,6\}$. De forma similar, em (3.3) encontram-se os FE dos critérios, no caso avaliado, sob a forma de um conjunto *fuzzy* esférico. Ademais, dado que o peso individual da opinião (ψ_a) possui índice $a = \{1,2,\dots,d\}$, o conjunto dos pesos será dado por $\psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_d\}$. Dessa forma, o vetor único Ψ, na Equação (3.4), possui como elementos os pesos individuais, de tal forma que ψ_d é definido como o peso do d-ésimo decisor experiente calculado conforme (3.1).

2. Como múltiplos decisores estão presentes na investigação, caracterizando-se como um problema de decisão em grupo, necessita-se agrupar o montante de d matrizes obtidas em (3.2) e em (3.3). Isso é realizado pelo SWAM, conforme ilustrado na Equação (2.5), resultando nas matrizes de decisão (3.5) e de FE (3.6) agregadas.

$$\tilde{\mathscr{D}} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{1,1} & \tilde{x}_{1,2} & \dots & \tilde{x}_{1,m} \\ \tilde{x}_{2,1} & \tilde{x}_{2,2} & \dots & \tilde{x}_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{n,1} & \tilde{x}_{n,2} & \dots & \tilde{x}_{n,m} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

$$\tilde{\mathscr{W}} = \begin{bmatrix} \tilde{w}_1 & \tilde{w}_2 & \dots & \tilde{w}_m \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

Em (3.5), $\tilde{x}_{n,m} = \{\mu_{\tilde{x}_{n,m}};\ \upsilon_{\tilde{x}_{n,m}};\ \pi_{\tilde{x}_{n,m}}\}$ é definida como a avaliação agregada do desempenho da alternativa n no critério m. Do mesmo modo, na Equação (3.6), apresenta-se $\tilde{w}_m$ como o FE agregado do critério m.

3. Tendo em vista que a operação de subtração é indefinida na lógica *fuzzy* esférica, as etapas subsequentes do PROMETHEE devem ser modificadas. Assim, primeiramente é aplicada uma abordagem do TOPSIS, consistindo na definição das soluções ideais positiva (3.7) e negativa (3.8) para cada critério em (3.5) (SHARAF, 2021).

Considerando $\mu_{x^+_{i,j}} = \max_i \mu_{i,j}$, $\upsilon_{x^+_{i,j}} = \min_i \upsilon_{i,j}$ e $\pi_{x^+_{i,j}} = \min_i \pi_{i,j}$:

$$x^+_j = \{\mu_{x^+_{i,j}};\ \upsilon_{x^+_{i,j}};\ \pi_{x^+_{i,j}}\} \tag{3.7}$$

Considerando $\mu_{x^-_{i,j}} = \min_i \mu_{i,j}$, $\upsilon_{x^-_{i,j}} = \max_i \upsilon_{i,j}$ e $\pi_{x^-_{i,j}} = \max_i \pi_{i,j}$:

$$x^-_j = \begin{cases} \{\mu_{x^-_{i,j}}; \upsilon_{x^-_{i,j}}; \pi_{x^-_{i,j}}\} & \text{se } \mu^2_{x^-_{i,j}} + \upsilon^2_{x^-_{i,j}} + \pi^2_{x^-_{i,j}} \leq 1, \\ \left\{\mu_{x^-_{i,j}}; \upsilon_{x^-_{i,j}}; \sqrt{1-(\mu^2_{x^-_{i,j}} + \upsilon^2_{x^-_{i,j}})}\right\} & \text{caso contrário.} \end{cases} \tag{3.8}$$

4. Como uma etapa intermediária antes da determinação dos desvios, calcula-se o grau relativo de proximidade de cada alternativa para cada critério ($RC[\tilde{c}_j(x_i)]$), conforme Equação (3.9) (SHARAF, 2021).

$$RC[\tilde{c}_j(x_i)] = \frac{D^-_j(x_i)}{D^+_j(x_i) + D^-_j(x_i)} \tag{3.9}$$

Onde $D^+_j(x_i)$ e $D^-_j(x_i)$ são as distâncias entre uma alternativa, x_i, e as respectivas soluções ideais positiva e negativa, para cada critério. Ambas são calculadas pelas Equações (3.10) e (3.11).

$$D^+_j(x_i) = \sqrt{\frac{1}{2F}\sum_{f=1}^{F}\left[(\mu^f_{x_{i,j}} - \mu^f_{x^+_{i,j}})^2 + (\upsilon^f_{x_{i,j}} - \upsilon^f_{x^+_{i,j}})^2 + (\pi^f_{x_{i,j}} - \pi^f_{x^+_{i,j}})^2\right]} \tag{3.10}$$

$$D^-_j(x_i) = \sqrt{\frac{1}{2F}\sum_{f=1}^{F}\left[(\mu^f_{x_{i,j}} - \mu^f_{x^-_{i,j}})^2 + (\upsilon^f_{x_{i,j}} - \upsilon^f_{x^-_{i,j}})^2 + (\pi^f_{x_{i,j}} - \pi^f_{x^-_{i,j}})^2\right]} \tag{3.11}$$

Em que F representa a quantidade de conjuntos *fuzzy* esféricos incluídos na medida de distância euclidiana (GÜNDOĞDU; KAHRAMAN, 2019). Nesse caso, como se considera somente uma alternativa e sua respectiva solução ideal por critério, utiliza-se $F = 1$.

5. Cálculo do desvio entre duas alternativas da matriz de decisão agregada, x_i e $x_{i'}$, para cada critério ($d_j(x_i, x_{i'})$) a partir dos graus relativos da etapa 4. Para isso, utiliza-se a Equação (3.12) (SHARAF, 2021). Ressalta-se que o índice i' é utilizado para representar uma alternativa distinta de i.

$$d_j(x_i, x_{i'}) = RC[\tilde{c}_j(x_i)] - RC[\tilde{c}_j(x_{i'})] \tag{3.12}$$

6. Como contribuição ao método de Sharaf (2021), realiza-se a avaliação da preferência (P) entre duas alternativas para cada critério através da função do critério usual (BRANS *et al.*,

1986). Isso se dá uma vez que se usam, no modelo em questão, somente critérios construídos, logo a preferência é facilmente identificável pela alternativa de melhor desempenho, conforme é ilustrado na Equação 3.13. Dessa forma, não é necessário o uso de limiares de preferência e indiferença, uma vez que se introduziria complexidade desnecessária ao modelo, assim como subjetividade adicional na determinação desses parâmetros.

$$P[d_j(x_i, x_{i'})] = \begin{cases} 0 & \text{se } d_j(x_i, x_{i'}) = 0, \\ 1 & \text{se } d_j(x_i, x_{i'}) \neq 0. \end{cases} \tag{3.13}$$

Em seguida, utilizar uma função de preferência linguística para adaptar o valor inteiro em (3.13) para um conjunto *fuzzy* esférico (SHARAF, 2021):

- P = 0 indica indiferença entre duas alternativas, resultando em $\{0{,}5;\ 0{,}5;\ 0{,}5\}$.
- P = 1 indica estrita preferência de uma alternativa que tenha a melhor avaliação, ou desempenho, em relação à outra, logo $\{1;\ 0;\ 0\}$.

Em sequência, agrupá-los em matrizes de preferências *fuzzy* esféricas ($\tilde{\mathscr{R}}_s^j$), conforme é exposto em (3.14).

$$\tilde{\mathscr{R}}_s^j = \left[\tilde{r}_{i,i'}^j\right] = \begin{bmatrix} - & \left\{\mu_{1,2}^j; \upsilon_{1,2}^j; \pi_{1,2}^j\right\} & \dots & \left\{\mu_{1,n}^j; \upsilon_{1,n}^j; \pi_{1,n}^j\right\} \\ \left\{\mu_{2,1}^j; \upsilon_{2,1}^j; \pi_{2,1}^j\right\} & - & \dots & \left\{\mu_{2,n}^j; \upsilon_{2,n}^j; \pi_{2,n}^j\right\} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left\{\mu_{n,1}^j; \upsilon_{n,1}^j; \pi_{n,1}^j\right\} & \left\{\mu_{n,2}^j; \upsilon_{n,2}^j; \pi_{n,2}^j\right\} & \dots & - \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

7. Construção da matriz de preferência *fuzzy* ponderada ($\tilde{\mathscr{R}}_s$) para cada caso analisado. Tal processo é composto pela multiplicação dos FE de (3.6) pelos índices de preferência de (3.14), segundo indicado na Equação (3.15) (SHARAF, 2021).

$$\tilde{\mathscr{R}}_s = \left[\tilde{r}_{i,i'}\right] = \begin{bmatrix} - & \sum_{j=1}^m \left(\tilde{w}_j \otimes \tilde{r}_{1,2}^j\right) & \dots & \sum_{j=1}^m \left(\tilde{w}_j \otimes \tilde{r}_{1,n}^j\right) \\ \sum_{j=1}^m \left(\tilde{w}_j \otimes \tilde{r}_{2,1}^j\right) & - & \dots & \sum_{j=1}^m \left(\tilde{w}_j \otimes \tilde{r}_{2,n}^j\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{j=1}^m \left(\tilde{w}_j \otimes \tilde{r}_{n,1}^j\right) & \sum_{j=1}^m \left(\tilde{w}_j \otimes \tilde{r}_{n,2}^j\right) & \dots & - \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

8. Cálculo dos fluxos positivo ($\phi^+(x_i)$) e negativo ($\phi^-(x_i)$) de sobreclassificação a partir do somatório das colunas, Equação (3.16), e das linhas, Equação (3.17), da matriz em (3.15), respectivamente (SHARAF, 2021).

$$\phi^{+}(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i'=1,\ i' \neq i}^{n} \tilde{r}_{i,i'} \tag{3.16}$$

$$\phi^{-}(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i'=1,\ i' \neq i}^{n} \tilde{r}_{i',i} \tag{3.17}$$

9. Como última etapa, a partir da Equação (3.18), realiza-se o cálculo do fluxo líquido de sobreclassificação ($\phi(x_i)$) pela diferença entre (3.16) e (3.17), ambos transformados em valores nítidos por meio da Equação (2.6). As alternativas, portanto, são ranqueadas em ordem decrescente de $\phi(x_i)$.

$$\phi(x_i) = \mathbf{S}\left[\phi^{+}(x_i)\right] - \mathbf{S}\left[\phi^{-}(x_i)\right] \tag{3.18}$$

Os cálculos presentes nas nove etapas descritas são efetuados em uma planilha eletrônica. A avaliação de seus resultados é descrita no Capítulo 4.

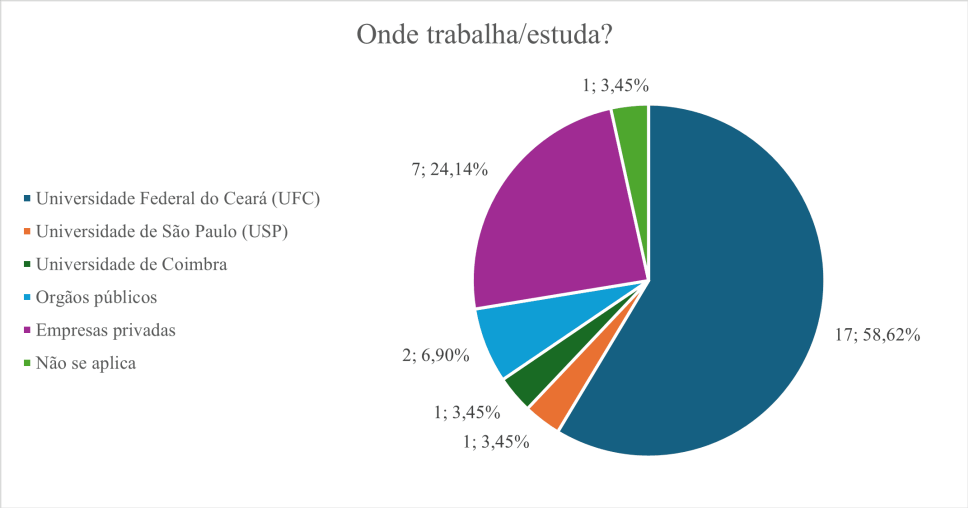
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, inicialmente é realizada a análise do perfil dos decisores. Tal procedimento, na Seção 4.1, é regido pela apuração de suas respostas às três perguntas inaugurais do formulário. Em seguida, na Seção 4.2, investigam-se os resultados do PROMETHEE II *fuzzy* esférico. na Seção 4.3, por sua vez, infere-se a robustez do método empregado. Finalmente, na Seção 4.4 é conduzida uma análise geral dos resultados mais importantes.

4.1 Sobre os decisores

Conforme Seção 3.3, a fim de categorizar os decisores, inicialmente aplicam-se três perguntas relativas ao local de trabalho ou estudo, ao cargo atualmente exercido e à experiência na área de H_2V. Assim, com montante de 29 participantes no questionário, suas respostas são representadas nas Figuras 4, 5 e 6, respectivamente.

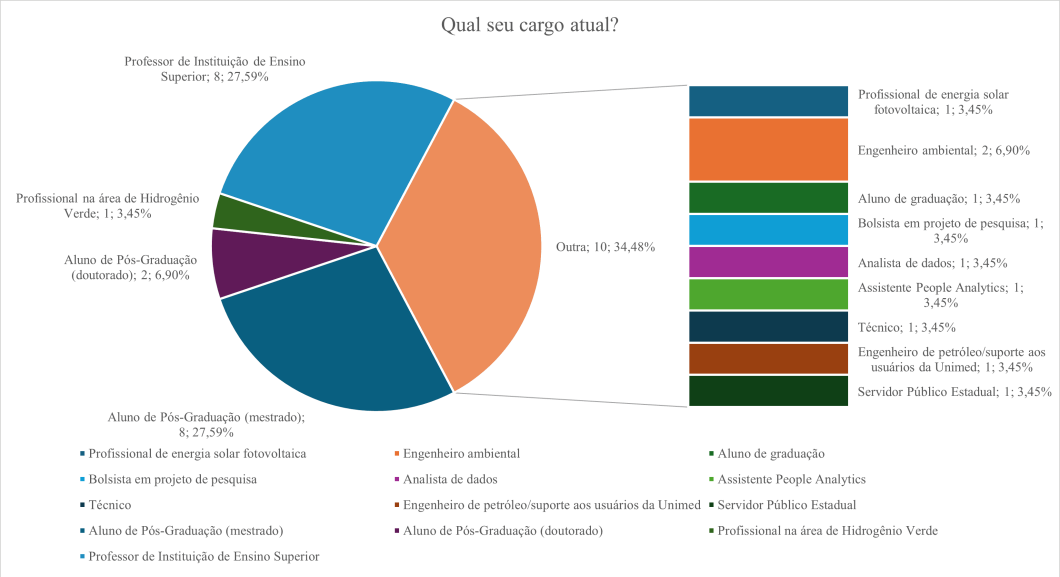
Figura 4 – Fração correspondente ao local de trabalho, ou estudo, dos participantes



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4, verifica-se predominância de indivíduos do meio acadêmico, de forma a totalizar 66% dos inquiridos, com maior parcela da Universidade Federal do Ceará (UFC), possuindo 17, seguida da Universidade de São Paulo (USP) e da Universidade de Coimbra, ambas com um respondente. Tal fato deve-se à facilidade do contato entre pessoas do mesmo meio, fortalecendo a cooperação entre universidades. Contudo, é notável a porcentagem de indivíduos da iniciativa privada, englobando cerca de 24%, com sete pessoas de empresas diversas, cujos nomes são omitidos por questões de privacidade.

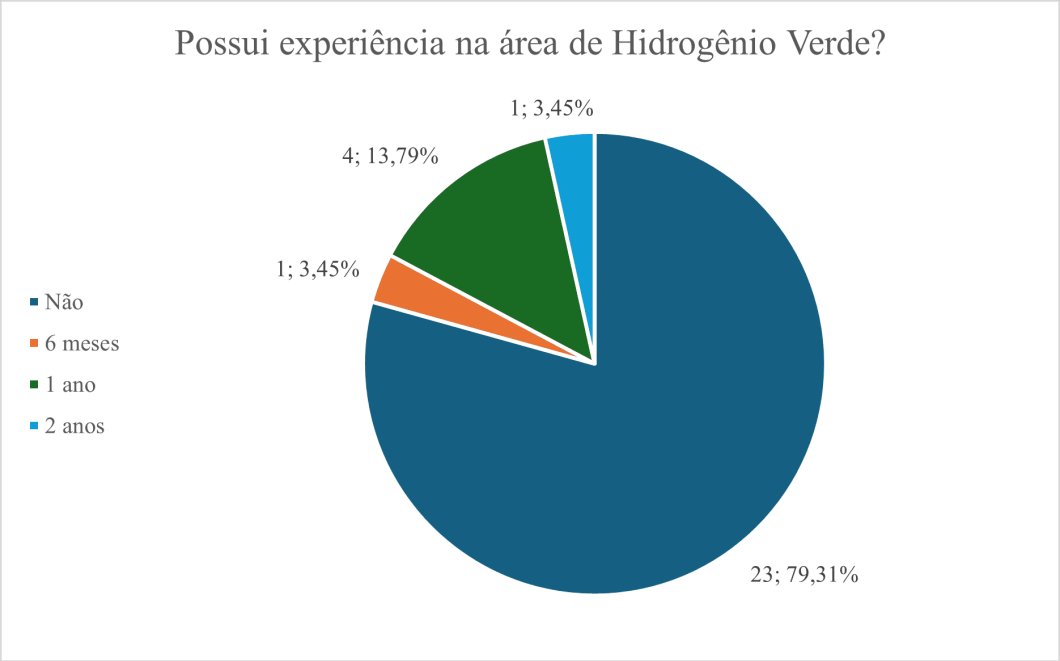
Figura 5 – Fração correspondente ao cargo atual dos participantes



Fonte: Elaborado pelo autor

Uma maior diversificação dos dados é constatada na Figura 5. Nela, 69% dos respondentes ocupam cargos, ou estudam, na academia, totalizando 20 indivíduos: professores de Instituições de Ensino Superior, alunos de graduação e Pós-Graduação, e bolsista em projeto de pesquisa. Outra parcela significativa do gráfico, cerca de 34,5%, é subdividida em nove categorias, correspondendo a dez pessoas. Outrossim, confirma-se a participação de um especialista na área de H_2V. Com isso, verifica-se a pluralidade profissional dos indivíduos consultados.

Figura 6 – Fração correspondente à experiência dos participantes com H_2V



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 6, atesta-se que significativa parcela dos participantes não possui experiência na área de H_2V, representando cerca de 79%. Tal fato é atribuído à relativa incipiência do tema no meio acadêmico nacional e da cadeia produtiva de H_2V, resultando na escassez de mão de obra qualificada e experiente no setor. Apesar disso, algum nível de experiência, variando de seis meses a dois anos, é relatado por seis pessoas. Logo, esses indivíduos são escolhidos para contribuir aos resultados do modelo, caracterizando-se como decisores. Dessa forma, o cálculo dos pesos de suas opiniões é realizado conforme descrito na Equação (3.1), com $d = 6$. Assim, no Quadro 3 são compilados o montante de decisores, seus respectivos anos de experiência e pesos associados, por ordem decrescente de experiência.

Quadro 3 – Peso das opiniões dos decisores

Participantes	Quantidade de experiência	Peso
Decisor 7	Dois anos	0,3077
Decisor 4, 6, 18 e 23	Um ano	0,1538
Decisor 20	Seis meses	0,0769

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 PROMETHEE II *fuzzy* esférico

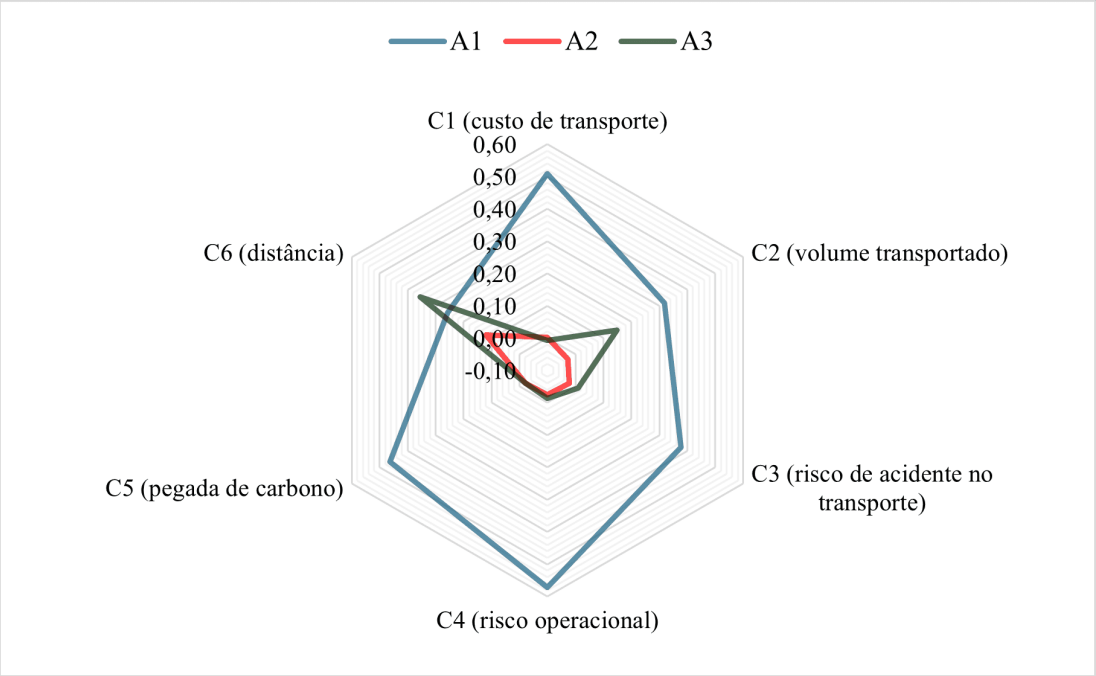
Com a apuração das respostas ao questionário, a aplicação do PROMETHEE II *fuzzy* esférico dá-se segundo as etapas de 3.4. No primeiro passo, compilam-se as matrizes individuais de decisão e de FE dos critérios em uma planilha eletrônica, utilizando a Equação (2.5), segundo os pesos do Quadro 3, para agregar as opiniões dos decisores. Dessa forma, a matriz de decisão agregada da investigação é representada na Equação (4.1).

$$\tilde{\mathscr{D}} = \begin{bmatrix} \{0,868;\ 0,134;\ 0,155\} & \{0,791;\ 0,223;\ 0,227\} & \{0,826;\ 0,180;\ 0,211\} & \{0,883;\ 0,118;\ 0,127\} & \{0,850;\ 0,153;\ 0,169\} & \{0,764;\ 0,257;\ 0,258\} \\ \{0,524;\ 0,509;\ 0,415\} & \{0,529;\ 0,567;\ 0,179\} & \{0,428;\ 0,599;\ 0,449\} & \{0,468;\ 0,568;\ 0,399\} & \{0,426;\ 0,592;\ 0,444\} & \{0,685;\ 0,336;\ 0,340\} \\ \{0,503;\ 0,532;\ 0,396\} & \{0,679;\ 0,346;\ 0,290\} & \{0,533;\ 0,493;\ 0,386\} & \{0,478;\ 0,547;\ 0,408\} & \{0,426;\ 0,592;\ 0,444\} & \{0,808;\ 0,205;\ 0,211\} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Para melhor visualizar o desempenho das alternativas para cada critério em (4.1), aplica-se a Equação (2.6) a fim de transformar os conjuntos *fuzzy* esféricos em valores nítidos. Com essa abordagem, é possível ordená-los em uma relação diretamente proporcional com sua pontuação, segundo descrito na Seção 3.3, sendo independente dos cinco casos analisados. Logo, tais informações são ilustradas na Figura 7.

Verifica-se o desempenho parcialmente dominante de A_1, transporte por meio de gasoduto adaptado de gás natural, em relação aos demais modos terrestres devido a sua maior área no gráfico da Figura 7. A exceção encontra-se em C_6, o critério de distância. Em sequência,

Figura 7 – Pontuação dos critérios nas três alternativas de transporte



Fonte: Elaborado pelo autor

A_3 é considerado melhor, no atual contexto decisório, que A_2, excetuando-se em C_1, custo de transporte, em que se verifica diminuta vantagem do último. Todavia, o ordenamento final depende dos FE dos critérios de cada caso, sendo analisados nas seções seguintes.

Em sequência, aplicam-se (3.7) e (3.8) para determinar as soluções ideais positiva e negativa da matriz em (4.1), respectivamente. Seus valores x_j^+ e x_j^- são compilados no Quadro 4.

Quadro 4 – Soluções ideais positiva e negativa

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
x_j^+	{0,868; 0,134; 0,155}	{0,791; 0,223; 0,179}	{0,826; 0,180; 0,211}	{0,883; 0,118; 0,127}	{0,850; 0,153; 0,169}	{0,808; 0,205; 0,211}
x_j^-	{0,503; 0,532; 0,415}	{0,529; 0,567; 0,290}	{0,428; 0,599; 0,449}	{0,468; 0,568; 0,408}	{0,426; 0,592; 0,444}	{0,685; 0,336; 0,340}

Fonte: Elaborado pelo autor

Na etapa seguinte, utiliza-se de (3.9) para o cálculo do grau relativo de proximidade das alternativas para cada critério. No Quadro 5, encontram-se os resultados de $RC[\tilde{c}_j(x_i)]$.

Quadro 5 – Valores de $RC[\tilde{c}_j(x_i)]$ no contexto decisório

	$RC[\tilde{c}_1(x_i)]$	$RC[\tilde{c}_2(x_i)]$	$RC[\tilde{c}_3(x_i)]$	$RC[\tilde{c}_4(x_i)]$	$RC[\tilde{c}_5(x_i)]$	$RC[\tilde{c}_6(x_i)]$
A_1	1,0000	0,9007	1,0000	1,0000	1,0000	0,6266
A_2	0,0521	0,2040	0,0000	0,0124	0,0000	0,0000
A_3	0,0319	0,5724	0,2596	0,0355	0,0000	1,0000

Fonte: Elaborado pelo autor

Aplicando a Equação (3.12), determinam-se os desvios par a par de alternativas, cujos valores $d_j(x_i, x_{i'})$ são compilados no Quadro 6.

Quadro 6 – Desvios entre pares de alternativas

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
$d_j(A_1,A_2)$	0,9479	0,6967	1,0000	0,9876	1,0000	0,6266
$d_j(A_1,A_3)$	0,9681	0,3283	0,7404	0,9645	1,0000	-0,3734
$d_j(A_2,A_1)$	-0,9479	-0,6967	-1,0000	-0,9876	-1,0000	-0,6266
$d_j(A_2,A_3)$	0,0202	-0,3684	-0,2596	-0,0232	0,0000	-1,0000
$d_j(A_3,A_1)$	-0,9681	-0,3283	-0,7404	-0,9645	-1,0000	0,3734
$d_j(A_3,A_2)$	-0,0202	0,3684	0,2596	0,0232	0,0000	1,0000

Fonte: Elaborado pelo autor

Na sequência, avalia-se a preferência numérica entre pares de alternativas por meio de (3.13). Os valores de $P[d_j(x_i,x_{i'})]$ estão representados no Quadro 7.

Quadro 7 – Relação de preferência numérica entre pares de alternativas

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
$P[d_j(A_1,A_2)]$	1	1	1	1	1	1
$P[d_j(A_1,A_3)]$	1	1	1	1	1	-1
$P[d_j(A_2,A_1)]$	-1	-1	-1	-1	-1	-1
$P[d_j(A_2,A_3)]$	1	-1	-1	-1	0	-1
$P[d_j(A_3,A_1)]$	-1	-1	-1	-1	-1	1
$P[d_j(A_3,A_2)]$	-1	1	1	1	0	1

Fonte: Elaborado pelo autor

Sobre o Quadro 7, devido ao fato dos critérios serem modelados como benéficos, se $d_j(x_i,x_k) > 0$ então $P = 1$, logo correspondendo ao conjunto *fuzzy* esférico $\{1;\ 0;\ 0\}$. Consequentemente, atribui-se ao par inverso igual valor numérico, porém com sinal trocado, isto é, $d_j(x_k,x_i) < 0$. Nesse caso, $P = -1$ somente para indicação da troca do grau de afiliação pelo de não-afiliação, resultando em $\{0;\ 1;\ 0\}$ (SHARAF, 2021). Em adição, verificam-se relações de estrita preferência predominantes entre as alternativas, excetuando-se em C_5, pegada de carbono, no par A_2A_3. Isso acontece pois ambos os modos constituem o transporte por caminhão, logo o mesmo combustível é utilizado, tornando-os indiferentes entre si.

Dessa forma, através de uma função de preferência linguística, conforme Seção 3.4, geram-se as matrizes de preferência *fuzzy* esféricas para os seis critérios estudados. Essas matrizes estão especificadas nas Equações (4.2) até (4.7).

$$\tilde{\mathscr{R}}_s^1 = \begin{bmatrix} - & \{1;\ 0;\ 0\} & \{1;\ 0;\ 0\} \\ \{0;\ 1;\ 0\} & - & \{1;\ 0;\ 0\} \\ \{0;\ 1;\ 0\} & \{0;\ 1;\ 0\} & - \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

$$\tilde{\mathscr{R}}_s^2 = \begin{bmatrix} - & \{1;\ 0;\ 0\} & \{1;\ 0;\ 0\} \\ \{0;\ 1;\ 0\} & - & \{0;\ 1;\ 0\} \\ \{0;\ 1;\ 0\} & \{1;\ 0;\ 0\} & - \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

$$\tilde{\mathscr{R}}_s^3 = \begin{bmatrix} - & \{1;\ 0;\ 0\} & \{1;\ 0;\ 0\} \\ \{0;\ 1;\ 0\} & - & \{0;\ 1;\ 0\} \\ \{0;\ 1;\ 0\} & \{1;\ 0;\ 0\} & - \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

$$\tilde{\mathscr{R}}_s^4 = \begin{bmatrix} - & \{1;\ 0;\ 0\} & \{1;\ 0;\ 0\} \\ \{0;\ 1;\ 0\} & - & \{0;\ 1;\ 0\} \\ \{0;\ 1;\ 0\} & \{1;\ 0;\ 0\} & - \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

$$\tilde{\mathscr{R}}_s^5 = \begin{bmatrix} - & \{1;\ 0;\ 0\} & \{1;\ 0;\ 0\} \\ \{0;\ 1;\ 0\} & - & \{0,5;\ 0,5;\ 0,5\} \\ \{0;\ 1;\ 0\} & \{0,5;\ 0,5;\ 0,5\} & - \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

$$\tilde{\mathscr{R}}_s^6 = \begin{bmatrix} - & \{1;\ 0;\ 0\} & \{0;\ 1;\ 0\} \\ \{0;\ 1;\ 0\} & - & \{0;\ 1;\ 0\} \\ \{1;\ 0;\ 0\} & \{1;\ 0;\ 0\} & - \end{bmatrix} \tag{4.7}$$

Nas etapas seguintes, realiza-se o ordenamento das alternativas de transporte para cada caso especificado em 3.2.1.

4.2.1 Caso Nordeste

No cenário em que o consumidor de H_2V localiza-se na região Nordeste, os FE agregados dos critérios nas duas suposições, existência (s_1) e ausência (s_0) de rede de gasoduto, são compilados no Quadro 8. Para esse propósito, novamente utiliza-se de (2.5). Outrossim, visando melhorar a visualização do nível de importância dos critérios, calcula-se a pontuação dos conjuntos *fuzzy* correspondentes pela Equação (2.6), ilustrando seus resultados na Figura 8.

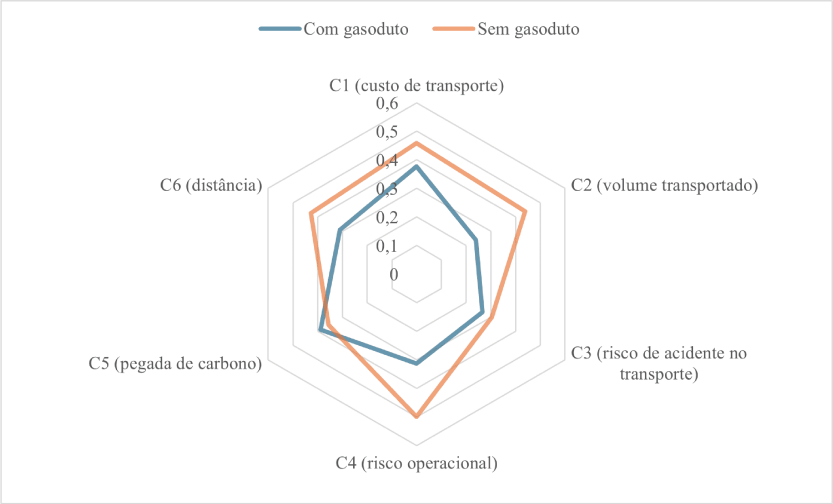
Assim, nota-se ênfase na importância dos critérios em s_0, ou seja, na indisponibilidade de uma rede de gasoduto até o consumidor final. Isso acontece pois sua ausência

Quadro 8 – FE dos critérios no caso NE

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
s_1	{0,815; 0,203; 0,201}	{0,751; 0,264; 0,261}	{0,775; 0,231; 0,259}	{0,790; 0,214; 0,230}	{0,834; 0,172; 0,210}	{0,760; 0,265; 0,199}
s_0	{0,860; 0,145; 0,182}	{0,845; 0,159; 0,183}	{0,794; 0,213; 0,242}	{0,862; 0,140; 0,154}	{0,808; 0,205; 0,211}	{0,837; 0,166; 0,183}

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 8 – Pontuação dos FE dos critérios no caso NE



Fonte: Elaborado pelo autor

representa um impeditivo a uma tomada de decisão menos complexa, que seria facilitada pela distância da produção ao consumidor no eixo Nordeste - Nordeste. Pela Figura 8, verifica-se uma exceção em C_5, pegada de carbono, que se mostra mais relevante em s_1. Em adição, C_4 em s_0 é caracterizado como o critério mais importante do cenário em questão, sendo possível pressupor maiores preocupações dos decisores no seguinte ponto: sem uma rede de gasoduto, há possibilidade de sua construção, consequentemente intensificando a complexidade do processo logístico e aumentando a atuação do risco operacional.

Na sequência, calculam-se as matrizes de preferência *fuzzy* ponderadas para ambas as suposições através de (3.15). Logo, $\tilde{\mathscr{R}}_{s_1}$ e $\tilde{\mathscr{R}}_{s_0}$ são apresentadas nas Equações (4.8) e (4.9), respectivamente.

$$\tilde{\mathscr{R}}_{s_1} = \begin{bmatrix} - & \{0,999;\ 0,000;\ 0,041\} & \{0,997;\ 0,000;\ 0,060\} \\ \{0,000;\ 1,000;\ 0,000\} & - & \{0,850;\ 0,106;\ 0,334\} \\ \{0,760;\ 0,265;\ 0,199\} & \{0,988;\ 0,002;\ 0,120\} & - \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

$$\tilde{\mathscr{R}}_{s_0} = \begin{bmatrix} - & \{1,000;\ 0,000;\ 0,020\} & \{0,999;\ 0,000;\ 0,035\} \\ \{0,000;\ 1,000;\ 0,000\} & - & \{0,884;\ 0,077;\ 0,295\} \\ \{0,837;\ 0,166;\ 0,183\} & \{0,997;\ 0,000;\ 0,063\} & - \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

Utilizando (3.16), (3.17) e (3.18), determinam-se os fluxos positivo, negativo e líquido de sobreclassificação do caso analisado, em sequência. Assim, tais resultados são compilados nos Quadros 9 e 10. Em adição, ilustra-se $\phi(x_i)$ na Figura 9, visando ordenar as alternativas.

Quadro 9 – Fluxos de sobreclassificação do caso NE, s_1

	$\phi^+(x_i)$	$\mathbf{S}[\phi^+(x_i)]$	$\phi^-(x_i)$	$\mathbf{S}[\phi^-(x_i)]$	$\phi(x_i)$
A_1	{0,998; 0,000; 0,050}	0,896	{0,592; 0,515; 0,176}	0,058	0,839
A_2	{0,688; 0,326; 0,346}	0,117	{0,996; 0,000; 0,070}	0,853	-0,736
A_3	{0,950; 0,022; 0,203}	0,524	{0,978; 0,007; 0,144}	0,678	-0,153

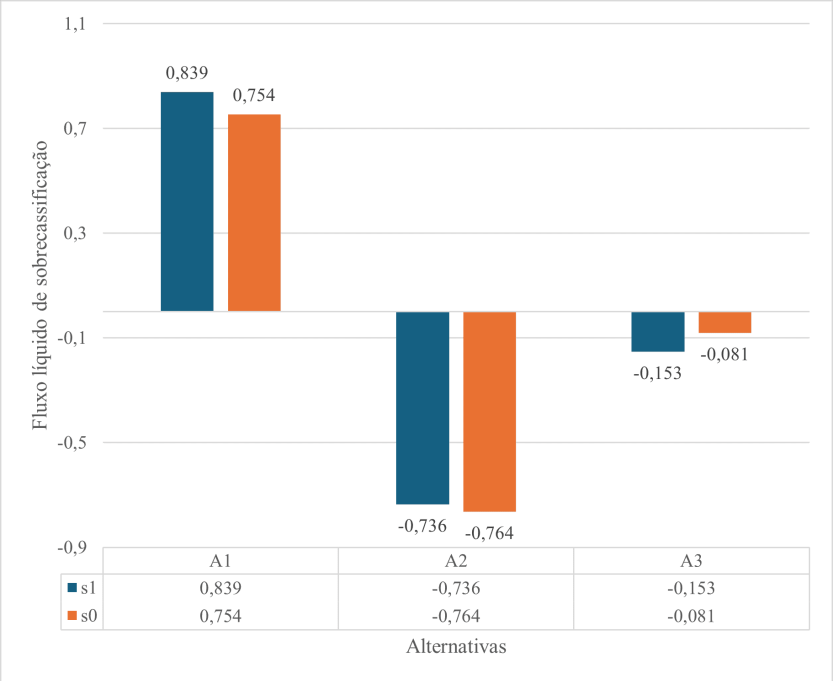
Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 10 – Fluxos de sobreclassificação do caso NE, s_0

	$\phi^+(x_i)$	$\mathbf{S}[\phi^+(x_i)]$	$\phi^-(x_i)$	$\mathbf{S}[\phi^-(x_i)]$	$\phi(x_i)$
A_1	{0,999; 0,000; 0,026}	0,946	{0,673; 0,407; 0,178}	0,192	0,754
A_2	{0,730; 0,277; 0,324}	0,162	{0,999; 0,000; 0,036}	0,926	-0,764
A_3	{0,977; 0,008; 0,134}	0,695	{0,988; 0,003; 0,102}	0,776	-0,081

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 9 – Valor de $\phi(x_i)$ no caso NE



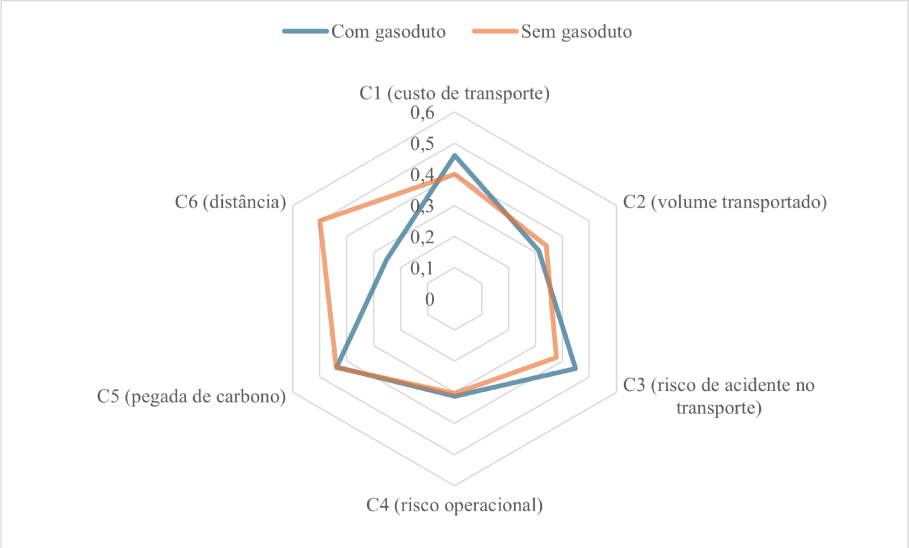
Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto, na Figura 9 verifica-se que, em ambas as suposições, a melhor alternativa é A_1, seguida de A_3, com A_2 em último lugar. Isso ocorre devido ao ranqueamento completo ser em ordem decrescente de ϕ, resultando em $\phi(A_1) > \phi(A_3) > \phi(A_2)$, no caso NE.

4.2.2 Caso Norte

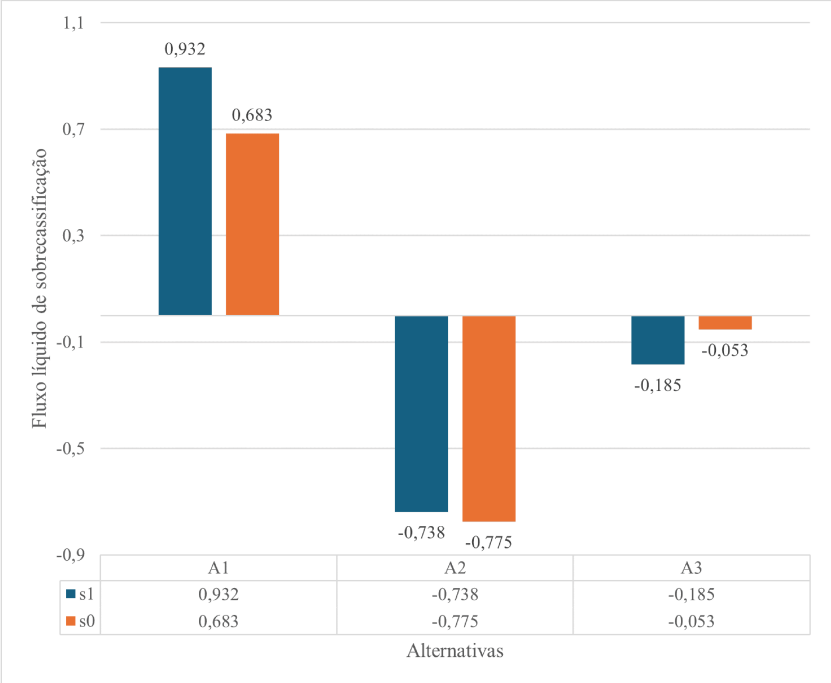
Replicando as etapas de cálculo de 4.2.1, obtém-se a pontuação dos FE dos critérios no cenário de distribuição a um consumidor na região Norte. Tais resultados são ilustrados na Figura 10. Em adição, realiza-se o ordenamento das alternativas, representando seus valores $\phi(x_i)$ na Figura 11.

Figura 10 – Pontuação dos FE dos critérios no caso N



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 11 – Valor de $\phi(x_i)$ no caso N



Fonte: Elaborado pelo autor

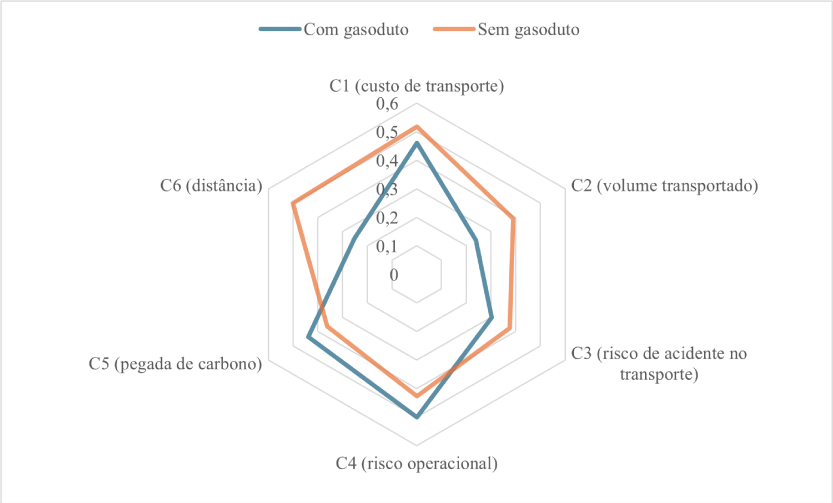
Na Figura 10, nota-se que diferentes níveis de importância são dispostos aos critérios pelos decisores, quando comparados ao primeiro cenário. No atual caso, em s_1, maior e menor grau de importância são atribuídos aos critérios C_1 e C_6, respectivamente; em s_0, C_6 e C_4, nessa sequência. Ao se comparar os FE dos critérios em ambas as suposições, verifica-se significativa importância dada à distância, possuindo pontuação aproximada de 0,5, assim se caracterizando como a maior do cenário. O segundo critério mais importante é o custo, no qual se atribui 0,46. Isso se dá em decorrência da complexidade do trajeto Nordeste - Norte no qual, a depender do estado em que se localiza o consumidor final, uma possível precariedade na infraestrutura de transporte na Floresta Amazônica se caracteriza como um obstáculo importante.

Sobre o ranqueamento das alternativas ilustrado na Figura 11, verifica-se a relação $\phi(A_1) > \phi(A_3) > \phi(A_2)$. Portanto, novamente há preferência em A_1, seguida de A_3, com A_2 em último lugar.

4.2.3 Caso Centro-Oeste

No cenário de distribuição à região Centro-Oeste, a pontuação dos critérios e o ordenamento das alternativas apresentam-se nas Figuras 12 e 13, em respectivo.

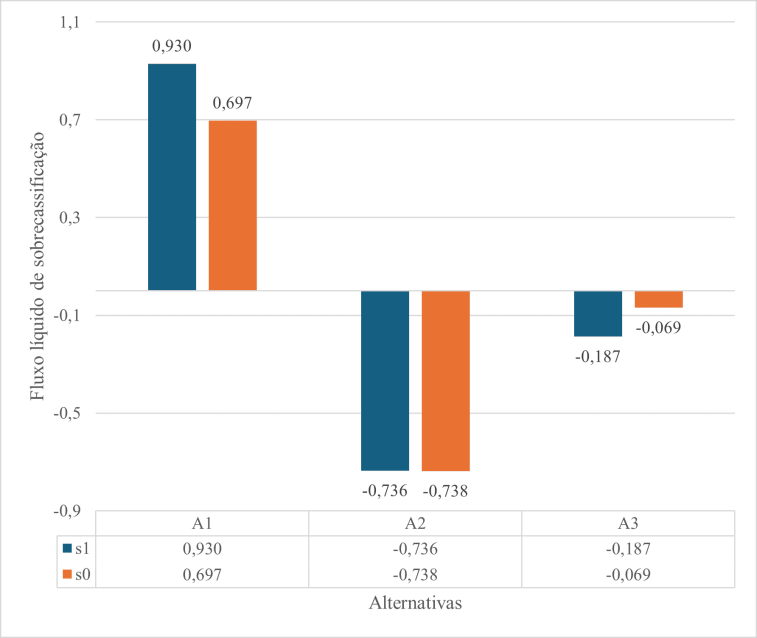
Figura 12 – Pontuação dos FE dos critérios no caso CO



Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando as informações na Figura 12 com os cenários anteriores, constata-se inversão em certos critérios. Agora, C_1 é determinado como o mais importante na suposição de ausência de gasoduto, s_0, em contrapartida aos casos NE e N. Tal fato pode ser atribuído à distância maior, ou acesso dificultado, como qualidade das estradas e terreno irregular, em que o transporte terrestre seria exposto na rota Nordeste - Centro-Oeste. Além disso, verifica-se um

Figura 13 – Valor de $\phi(x_i)$ no caso CO



Fonte: Elaborado pelo autor

significativo intervalo em C_6 entre s_0 e s_1, de forma similar ao cenário do Norte, corroborando para a suposição de maior percepção dos decisores em relação à distância na rota em questão. Em adição, aos critérios em s_0 é atribuída maior importância.

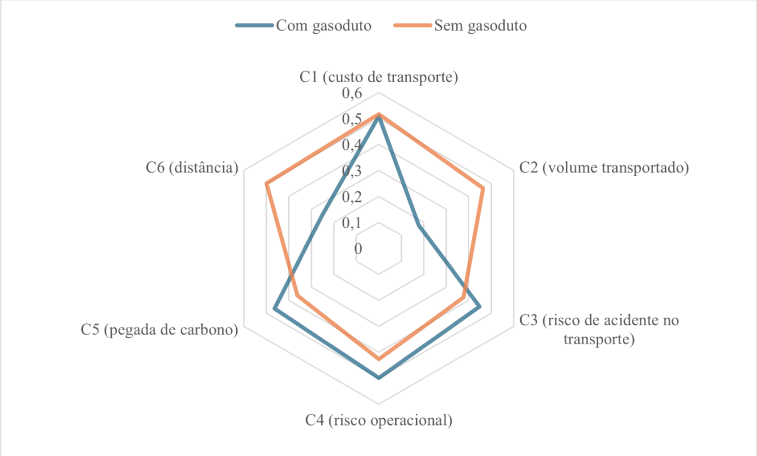
Na Figura 13, os resultados são análogos aos cenários anteriores. Dessa forma, constata-se preferência por A_1 devido ao ordenamento $\phi(A_1) > \phi(A_3) > \phi(A_2)$.

4.2.4 Caso Sudeste

No cenário em que o consumidor localiza-se na região Sudeste, nas Figuras 14 e 15 ilustram-se, respectivamente, a pontuação dos FE dos critérios e o ranqueamento das alternativas, com base em $\phi(x_i)$.

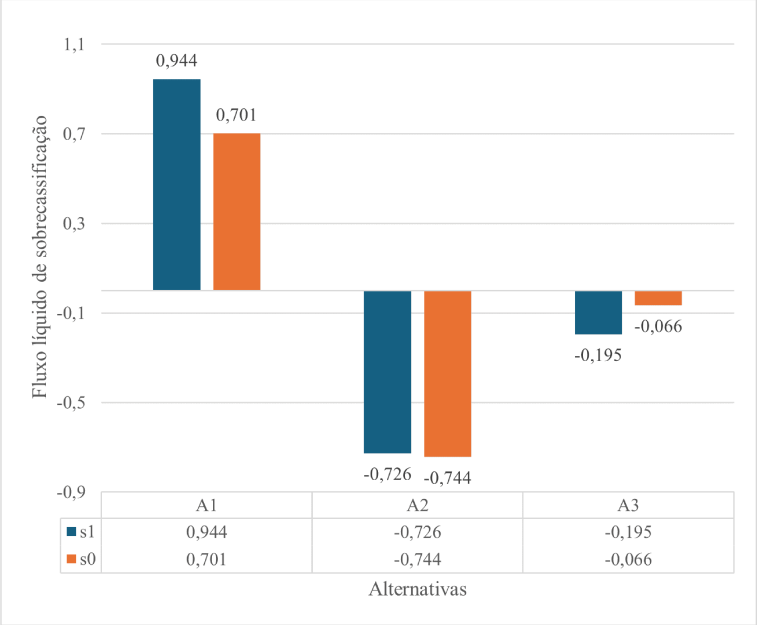
Mediante análise da Figura 14, é atestado que o critério C_1 é o mais importante em ambas as suposições, possuindo uma pontuação aproximada de 0,52. Este valor é considerado o maior, quando comparado aos cenários anteriores. Além disso, é apresentada uma relevância significativa de C_6 em s_0, sendo esta condizente com a hipótese de percepção de distância dos decisores; em s_1, são visualmente dominantes os critérios C_3, C_4 e C_5 em relação à ausência da rede de gasoduto. De modo geral, são apresentadas pontuações superiores dos FE no caso em questão, quando comparado aos outros cenários. Isso pode ser atribuído à intensa industrialização do Sudeste: é dada prioridade ao caso específico pelos decisores, sabendo-se do maior consumo energético da região e sua importância à indústria nacional, atribuindo-se melhores FE.

Figura 14 – Pontuação dos FE dos critérios no caso SE



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15 – Valor de $\phi(x_i)$ no caso SE



Fonte: Elaborado pelo autor

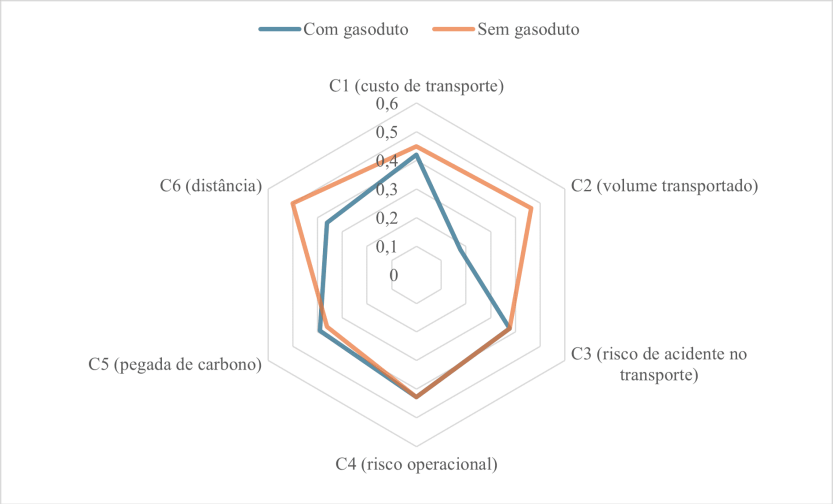
Na Figura 15, $\phi(A_1) > \phi(A_3) > \phi(A_2)$ indicando preferência por A_1. Mais uma vez, os resultados são análogos aos casos anteriores, sendo condizentes com o desempenho dos três modos de transporte, conforme Figura 7.

4.2.5 Caso Sul

No último cenário, com distribuição de H_2V ao Sul, verificam-se resultados próximos aos do Sudeste, segundo ilustrado na Figura 16. Nela, constata-se comportamento similar, em termos de importância, dos critérios em s_0, mas alteração na forma do gráfico em s_1, notavelmente em C_6, possuindo melhor avaliação quando comparado ao cenário do Sudeste. As

outras diferenças encontram-se no maior afunilamento do gráfico entre s_1 e s_0, indicando certa indiferença dos decisores sobre as suposições, e nas menores pontuações gerais dos critérios, ao comparar-se com o Sudeste. Com isso, nota-se que regiões similares, em termos de percepção dos decisores, tendem a possuir comportamentos semelhantes.

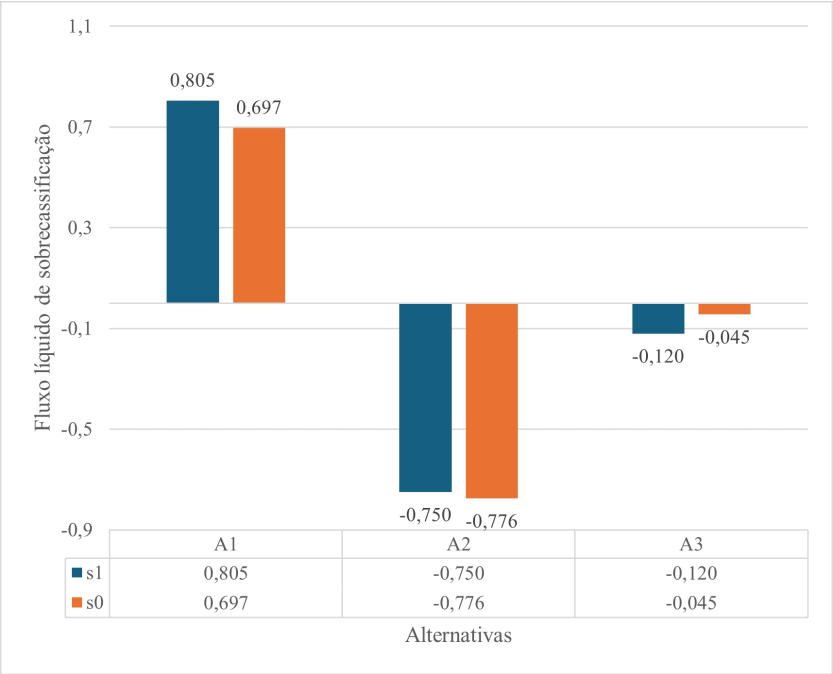
Figura 16 – Pontuação dos FE dos critérios no caso S



Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao ordenamento das alternativas, novamente A_1 é prioridade, conforme ilustrado na Figura 17. Dessa forma, igual ranqueamento é possuído por todos os casos.

Figura 17 – Valor de $\phi(x_i)$ no caso S



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Análise de sensibilidade

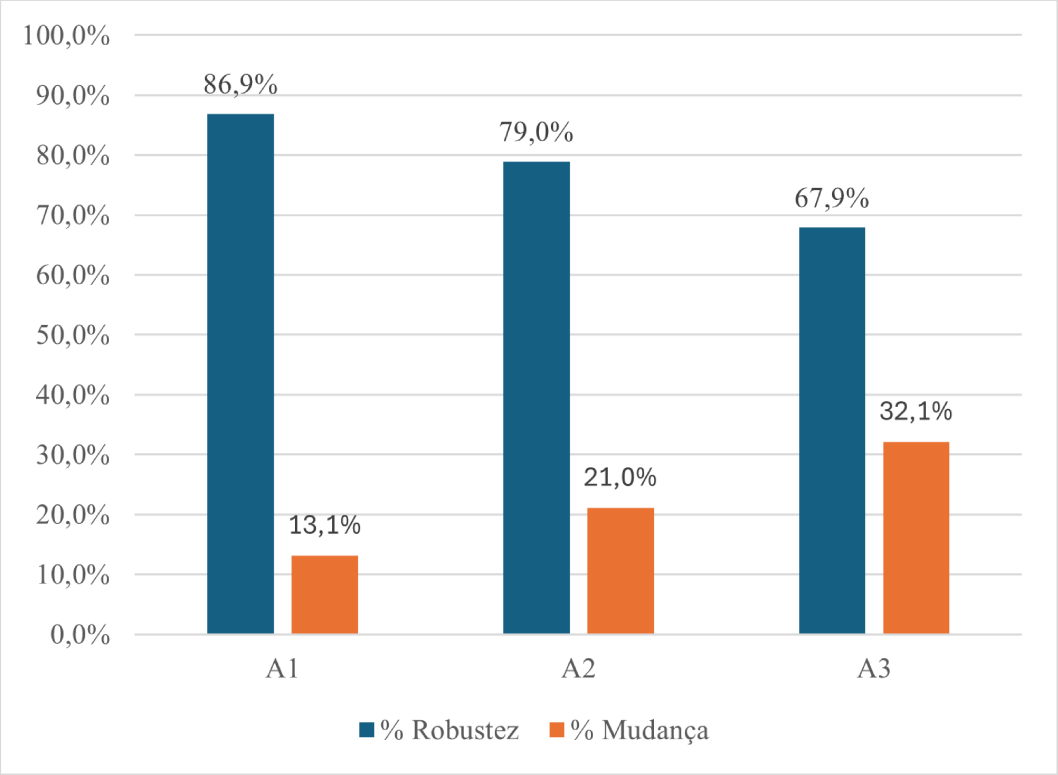
Objetivando a avaliação da robustez do modelo perante uma hipotética introdução de novos decisores no espaço amostral da pesquisa, uma análise de sensibilidade é conduzida a partir da mudança nos FE dos critérios. Ademais, definem-se os extremos da escala de Likert como limites superior e inferior de variação. Portanto, a cada critério é permitida a atribuição de cinco valores e a permutação destes, com repetição, integra o montante de cenários da análise, isto é, 15.625 avaliações. Na Equação (4.10), apresenta-se o cálculo da robustez, cuja referência é a ordem $\phi(A_1) > \phi(A_3) > \phi(A_2)$. Adicionalmente, na Equação (4.11) é determinada a mudança de ordem.

$$Robustez_{x_i} = \frac{Número\ de\ cenários\ com\ ordenamento\ inalterado}{15.625} \times 100\% \tag{4.10}$$

$$Mudança_{x_i} = 100\% - Robustez_{x_i} \tag{4.11}$$

A partir da aplicação de (4.10) e (4.11), resultam-se nos dados de sensibilidade para cada alternativa, sendo ilustrados na Figura 18. Nela, verifica-se robustez decrescente de A_1, com 87%, até A_3, possuindo 68%, aproximadamente; à A_2 é atribuído valor de 79%.

Figura 18 – Percentual de robustez e mudança das alternativas



Fonte: Elaborado pelo autor

Sendo a primeira alternativa, transporte por gasoduto, a mais viável no contexto decisório, chega-se à robustez de 87% na solução. Considerando o total de cenários analisados, o valor encontrado é significativo, comprovando a robustez do modelo.

Adicionalmente, torna-se possível a identificação dos tipos de alterações na ordem original, assim como suas frequências. Tais informações são compiladas no Quadro 11 e na Tabela 5.

Quadro 11 – Posição individual das alternativas nos cenários da análise de sensibilidade

	1° lugar (n°; %)	2° lugar (n°; %)	3° lugar (n°; %)
A_1	13.580; 86,9%	1.877; 12,0%	168; 1,1%
A_2	155; 1,0%	3.134; 20,1%	12.336; 79,0%
A_3	1.890; 12,1%	10.614; 67,9%	3.121; 20,0%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5 – Ordem dos resultados nos cenários da análise de sensibilidade

Ordem	N° de cenários	% do total
$\phi(A_1) > \phi(A_3) > \phi(A_2)$*	10.484	67,10%
$\phi(A_1) > \phi(A_2) > \phi(A_3)$	3.096	19,81%
$\phi(A_2) > \phi(A_1) > \phi(A_3)$	25	0,16%
$\phi(A_2) > \phi(A_3) > \phi(A_1)$	130	0,83%
$\phi(A_3) > \phi(A_1) > \phi(A_2)$	1.852	11,85%
$\phi(A_3) > \phi(A_2) > \phi(A_1)$	38	0,24%

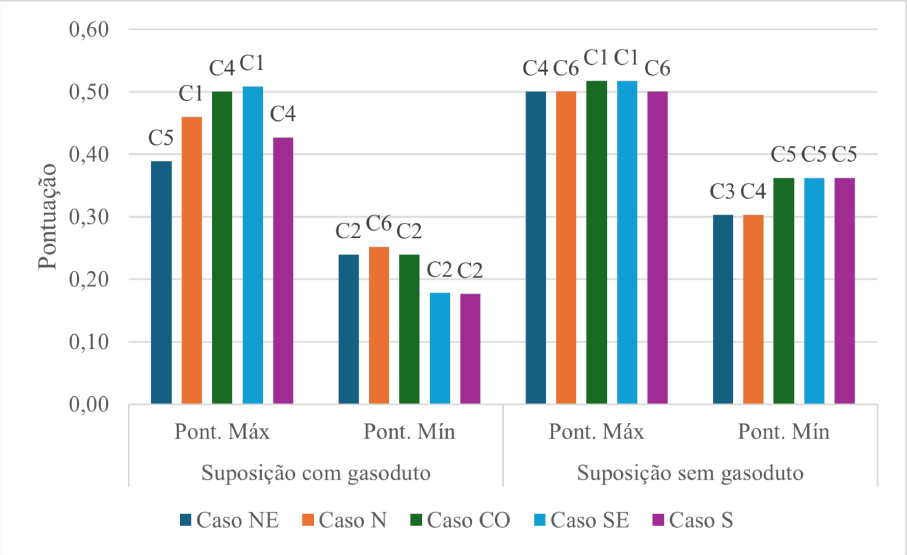
Fonte: Elaborado pelo autor
*Ordem original

Conforme exposto no Quadro 11 e na Tabela 5, nos casos em que existe reversão de ordem, o modo de caminhão com H_2V liquefeito é favorecido em 36,76% dos cenários, em contrapartida aos 3.01% contemplados pelo H_2V comprimido. Em outras palavras, existe maior possibilidade do primeiro lugar do ranqueamento ser ocupado por A_3, nesses cenários.

4.4 Disposições finais

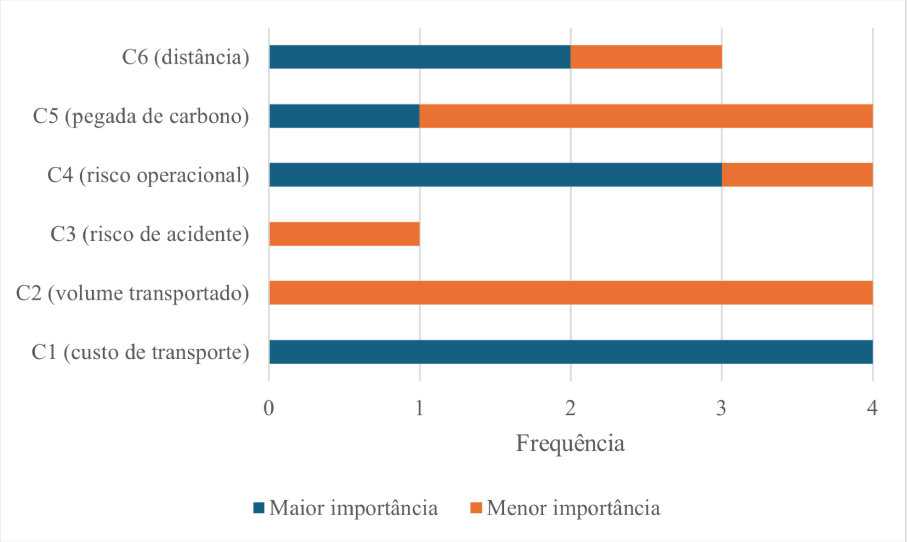
Em certos aspectos, semelhanças e contrastes estão presentes nos cinco casos de distribuição. A respeito dos critérios, na Figura 19 são ilustrados em termos de pontuação extrema, isto é, os de maior e menor relevância no contexto decisório, para cada caso e suposição. Complementarmente, na Figura 20 apresenta-se a frequência na qual as pontuações extremas são atribuídas aos critérios.

Figura 19 – Critérios máximos e mínimos, em nível de importância, nos cinco casos



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 – Frequência de inclusão dos critérios nas pontuações extremas



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 19, atesta-se que tanto critérios de pontuação máxima quanto mínima tendem a ser mais bem avaliados pelos decisores na suposição de ausência de rede de gasoduto. Isso é esperado, pois uma dificuldade adicional é relacionada à tal suposição, logo há uma significativa criticidade na atribuição dos FE. Em adição, há maior discrepância entre os cenários em s_1, indicando uma melhor distinção dos casos por parte dos decisores. Outrossim, os critérios mais importantes encontram-se no cenário SE, conforme discutido na Subseção 4.2.4.

Por meio da Figura 20, atesta-se C_1, custo de transporte, como critério mais relevante; C_2, por sua vez, é avaliado como pior parâmetro, seguido de C_3, já que menor pontuação é atribuída a ambos em 100% das vezes de inclusão nos extremos. O atributo pegada de carbono, C_5, é

considerado o terceiro pior critério, possuindo 75%. Em contrapartida, valores mais equilibrados são atribuídos a C_4 e C_6, com somente 25% e 33%, respectivamente. Isso indica o uso de funções linguísticas mais brandas pelos decisores, como "importante", "média importância" e "importância abaixo da média", conforme descrito na Tabela 4. Consequentemente, há maior hesitação nas alegações dos decisores a respeito dos FE desses critérios.

Em relação ao ordenamento das alternativas, em todos os cenários A_1, gasoduto de gás natural adaptado, é considerado como modo mais adequado, dentro do contexto decisório. Esse resultado é consistente com a literatura, considerando a maior segurança que essa alternativa apresenta, conforme ilustrado na Tabela 1. Em sequência, tem-se A_3, distribuição por caminhão com H_2V liquefeito, como segunda opção e A_2, H_2V comprimido, em último lugar. Tal resultado consistente em diferentes casos dá-se pelo desempenho atribuído aos modos pelos decisores, segundo exposto na Figura 7. Tendo visto que os seis critérios são modelados como benéficos, A_1 é sempre preferida em relação às outras opções, nos cenários estudados, pois são possuídas por ela significativas vantagens percentuais de C_1 até C_5, mas desvantagem fraca é constatada em C_6.

Nos modos terrestres à gasolina, A_2 e A_3, verificam-se pontos adversos intensos em riscos, tanto operacionais quanto de acidentes, em custo de transporte, em volume de H_2V transportado e em pegada de carbono. Além disso, A_3 é preferida sobre A_2, uma vez que menores riscos são inerentes à utilização do hidrogênio liquefeito, ao comparar-se com o comprimido, principalmente na redução da possibilidade de explosões.

Complementarmente, a partir da análise de sensibilidade se comprova a robustez da solução do modelo, possuindo somente 13% de mudança, aproximadamente. Dessa forma, atesta-se que pequenas variações nos FE dos critérios não são suficientes para alterar a tomada de decisão. Todavia, há possibilidade de reversões de ordem, sobretudo no sentido do favorecimento de A_3, validando a preferência supracitada pelo hidrogênio liquefeito.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste estudo, três modos de transporte foram ordenados, objetivando a seleção daquele mais viável à distribuição nacional de H_2V. Nesse contexto, analisaram-se cenários hipotéticos com produção fixa no Nordeste e consumidores localizados nas cinco regiões do país. Para tal, utilizou-se do PROMETHEE II aliado aos conceitos dos conjuntos *fuzzy* esféricos, em uma modelagem quantitativa empírica normativa.

Como diferencial do modelo de decisão proposto, aplicou-se o VFT para a determinação da problemática da pesquisa e das alternativas de transporte, assim como se possibilitou a elicitação dos critérios do problema. Adicionalmente, por meio de um questionário virtual, definiram-se as consequências das alternativas em cada atributo e os FE associados a partir de funções linguísticas, visando tornar o processo de apoio à decisão similar à cognição humana. Dessa forma, buscou-se facilitar a participação dos decisores no modelo.

Como contribuição ao método multicritério empregado, a etapa de avaliação das preferências deu-se segundo função de critério usual, uma vez que se usaram somente critérios construídos. Portanto, a preferência de uma alternativa sobre a outra é ditada exclusivamente pelo desempenho superior. A partir desta abordagem, evita-se a intensificação desnecessária da complexidade do modelo.

Com a aplicação do PROMETHEE II *fuzzy* esférico, chegou-se ao ranqueamento $\phi(A_1) > \phi(A_3) > \phi(A_2)$ em todos os casos analisados. Portanto, a alternativa mais viável do contexto decisório se configurou como o transporte de H_2V por gasoduto de gás natural, sendo esta a solução do modelo. Os outros modos de menor ordem, compreendendo transporte rodoviário do produto liquefeito ou comprimido, podem ser interpretados como opções secundárias, quando da indisponibilidade da primeira. Outrossim, infere-se que A_3 tende a ser melhor avaliada nesses casos devido à redução da possibilidade de explosões.

Por meio de uma análise de sensibilidade com variação dos FE dos critérios, atestou-se robustez da solução de 87%, aproximadamente. Atentando-se ao montante de cenários da análise, tal resultado é considerado significativo, logo a tomada de decisão não é alterada por pequenas modificações nos FE. Adicionalmente, possibilitou-se identificar reversões de ordem em 33% das 15.625 possibilidades, das quais: em 60,22%, A_1 é favorecida; em 36,76%, A_3; e em 3,01%, A_2. Dessa forma, valida-se a preferência pelo produto liquefeito, nos casos da indisponibilidade de A_1.

Ainda por meio do modelo, aferiu-se o nível de importância dos critérios e seus

respectivos graus de hesitação, por parte dos decisores. Em resumo, o custo de transporte, C_1, é estabelecido como atributo mais relevante, possuindo maior pontuação e, consequentemente, menor hesitação. Em sequência, têm-se risco operacional, C_4, pegada de carbono, C_5, e distância ao consumidor, C_6, como critérios de média importância e alta à média incerteza. Finalmente, volume de H_2V transportado, C_2, e risco de acidente no transporte, C_3, são classificados consistentemente como atributos de baixa relevância, logo possuem menor hesitação associada.

Visando o aprimoramento contínuo da investigação, sugere-se expandir os tipos de critérios utilizados, passando a uma combinação entre construídos e naturais, aumentando assim a flexibilidade da entrada de dados do modelo. Atributos normalmente subjetivos, como riscos, podem continuar a ser modelados como construídos através de uma escala de Likert; já critérios comumente objetivos e mensuráveis, como custo de transporte, volume de H_2V, pegada de carbono e distância ao consumidor podem passar à categoria de naturais. Uma transformação subsequente de número real a conjunto *fuzzy* pode ser empregada para dar continuidade às etapas de cálculo do método (SHARAF, 2023).

Concluindo, foi desenvolvido um guia para a tomada de decisão no contexto da logística de transporte de H_2V, englobando a aplicação do PROMETHEE e a avaliação da subjetividade das opiniões humanas. Tal processo é regido por natureza *preference-driven*, ou seja, considera-se o julgamento de valor dos decisores como força motriz do modelo. Portanto, os resultados são potencialmente modificados por alterações na quantidade de participantes, no intervalo de tempo de suas participações, ou até no nível de suas experiências com o H_2V.

REFERÊNCIAS

ABDEL-BASSET, M.; GAMAL, A.; CHAKRABORTTY, R. K.; RYAN, M. J. Evaluation of sustainable hydrogen production options using an advanced hybrid mcdm approach: A case study. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 46, n. 5, p. 4567–4591, 2021.

ACAR, C.; BESKESE, A.; TEMUR, G. T. Sustainability analysis of different hydrogen production options using hesitant fuzzy ahp. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 43, n. 39, p. 18059–18076, 2018.

AKRAM, M.; ZAHID, K.; KAHRAMAN, C. A promethee based outranking approach for the construction of fangcang shelter hospital using spherical fuzzy sets. **Artificial Intelligence in Medicine**, Elsevier, v. 135, p. 102456, 2023.

ALENCAR, M.; ALMEIDA, A. D. Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 35, n. 8, p. 3610–3619, 2010.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International journal of operations & production management**, MCB UP Ltd, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.

BRANS, J.-P.; VINCKE, P.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: The promethee method. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 24, n. 2, p. 228–238, 1986.

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia. Programa Nacional do Hidrogênio reforça estratégia do Brasil para liderar a transição energética**. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/programa-nacional-do-hidrogenio-reforca-estrategia-do-brasil-para-liderar-a-transicao-energetica. Acesso em: 10 de jan. 2024.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. NDC - a ambição climática do Brasil**. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/NDC. Acesso em: 13 de jan. 2024.

DAS, S.; PRADHAN, S.; DE, S. Multi criteria decision making for the most suitable combination of energy resources for a decentralized hybrid energy solution with green hydrogen as the storage option. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 285, p. 117028, 2023.

DEVECI, M. Site selection for hydrogen underground storage using interval type-2 hesitant fuzzy sets. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 43, n. 19, p. 9353–9368, 2018.

ELSEVIER. **Scopus: banco de dados**. 2023. Disponível em: https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic. Acesso em: 13 de out. 2023.

ENSSLIN, L.; NETO, G. M.; NORONHA, S. M. **Apoio à decisão: metodologias para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas**. [*S. l.*]: Insular, 2001.

GORAJ, R.; KICIŃSKI, M.; ŚLEFARSKI, R.; DUCZKOWSKA, A. Validity of decision criteria for selecting power-to-gas projects in poland. **Utilities Policy**, Elsevier, v. 83, p. 101619, 2023.

GÜNDOĞDU, F. K.; KAHRAMAN, C. Spherical fuzzy sets and spherical fuzzy topsis method. **Journal of intelligent & fuzzy systems**, IOS Press, v. 36, n. 1, p. 337–352, 2019.

HASSAN, I.; RAMADAN, H. S.; SALEH, M. A.; HISSEL, D. Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 149, p. 111311, 2021.

IORDACHE, M.; PAMUCAR, D.; DEVECI, M.; CHISALITA, D.; WU, Q.; IORDACHE, I. Prioritizing the alternatives of the natural gas grid conversion to hydrogen using a hybrid interval rough based dombi marcos model. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 47, n. 19, p. 10665–10688, 2022.

JALLER, M.; OTAY, I. Evaluating sustainable vehicle technologies for freight transportation using spherical fuzzy ahp and topsis. In: SPRINGER. **International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems**. [*S. l.*], 2020. p. 118–126.

JUNIOR, A. d. A. G.; SCHRAMM, V. B. Problem structuring methods: a review of advances over the last decade. **Systemic Practice and Action Research**, Springer, v. 35, n. 1, p. 55–88, 2022.

KAHRAMAN, C.; GÜNDOĞDU, F. K. **Decision Making with Spherical Fuzzy Sets – Theory and Applications**. Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Suíça: Springer, 2021. v. 392.

KEENEY, R. L. Value-focused thinking: Identifying decision opportunities and creating alternatives. **European Journal of operational research**, Elsevier, v. 92, n. 3, p. 537–549, 1996.

KEENEY, R. L. *et al.* Creativity in decision making with value-focused thinking. **Sloan Management Review**, v. 35, p. 33–33, 1994.

KUMAR, S.; ARZAGHI, E.; BAALISAMPANG, T.; ABAEI, M. M.; GARANIYA, V.; ABBASSI, R. A risk-based multi-criteria decision-making framework for offshore green hydrogen system developments: Pathways for utilizing existing and new infrastructure. **Sustainable Production and Consumption**, Elsevier, v. 46, p. 655–678, 2024.

LEWANDOWSKA-ŚMIERZCHALSKA, J.; TARKOWSKI, R.; ULIASZ-MISIAK, B. Screening and ranking framework for underground hydrogen storage site selection in poland. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 43, n. 9, p. 4401–4414, 2018.

LINS, P.; ALMEIDA, A. D. Multidimensional risk analysis of hydrogen pipelines. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 37, n. 18, p. 13545–13554, 2012.

MANAFZADEH, P.; HABIBIYAN, H.; HOSSEINPOUR, M.; TALEBI, S. Towards building clean hydrogen supply chain network in iran for future domestic demand and exports. part i: Prioritization of scenarios. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 72, p. 559–572, 2024.

MEDEIROS, C.; ALENCAR, M.; ALMEIDA, A. de. Hydrogen pipelines: enhancing information visualization and statistical tests for global sensitivity analysis when evaluating multidimensional risks to support decision-making. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 41, n. 47, p. 22192–22205, 2016.

MORADI, R.; GROTH, K. M. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 44, n. 23, p. 12254–12269, 2019.

ONER, O.; KHALILPOUR, K. Evaluation of green hydrogen carriers: a multi-criteria decision analysis tool. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 168, p. 112764, 2022.

OZCEYLAN, E.; OZKAN, B.; KABAK, M.; DAGDEVIREN, M. A state-of-the-art survey on spherical fuzzy sets. **Journal of Intelligent & Fuzzy Systems**, IOS Press, v. 42, n. 1, p. 195–212, 2022.

PAMUCAR, D.; ECER, F.; DEVECI, M. Assessment of alternative fuel vehicles for sustainable road transportation of united states using integrated fuzzy fucom and neutrosophic fuzzy marcos methodology. **Science of the Total Environment**, Elsevier, v. 788, p. 147763, 2021.

PAMUCAR, D.; IORDACHE, M.; DEVECI, M.; SCHITEA, D.; IORDACHE, I. A new hybrid fuzzy multi-criteria decision methodology model for prioritizing the alternatives of the hydrogen bus development: A case study from romania. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 46, n. 57, p. 29616–29637, 2021.

PECÉM. **Hub de hidrogênio verde no complexo do Pecém**. 2023. Disponível em: https://www.complexodopecem.com.br/hubh2v/. Acesso em: 25 de jan. 2024.

QUINTELA, S. **Hidrogênio verde: Ceará negocia com mais 4 empresas e pode ter 24 investimentos**. 2022. Disponível em: https://shre.ink/diariodonordeste. Acesso em: 11 de set. 2023.

REN, J.; LIANG, H. Measuring the sustainability of marine fuels: A fuzzy group multi-criteria decision making approach. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier, v. 54, p. 12–29, 2017.

SAXENA, A.; YADAV, A. K. Evaluating the appropriate fuel-based bus technology in indian context by integrating fuzzy ahp-fuzzy topsis. **European Transportation-Trasporti Europei**, n. 92, p. 1–15, 2023.

SDE. **Missão oficial do Governo do Ceará: avanços em energias renováveis**. 2024. Disponível em: https://www.sde.ce.gov.br/2024/03/21/missao-oficial-do-governo-do-ceara-avancos-em-energias-renovaveis/. Acesso em: 23 de mar. 2024.

SEEG. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil**. 2024. Disponível em: https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf. Acesso em: 18 de dez. 2024.

SHARAF, I. M. Evaluating geothermal energy systems using spherical fuzzy promethee. **Decision Making with Spherical Fuzzy Sets: Theory and Applications**, Springer, p. 375–397, 2021.

SHARAF, I. M. A new approach for spherical fuzzy topsis and spherical fuzzy vikor applied to the evaluation of hydrogen storage systems. **Soft Computing**, Springer, v. 27, n. 8, p. 4403–4423, 2023.

VIANA, F. F. C. L.; ALENCAR, M. H.; FERREIRA, R. J. P.; ALMEIDA, A. T. D. Multidimensional risk assessment and categorization of hydrogen pipelines. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 47, n. 42, p. 18424–18440, 2022.

WANNIARACHCHI, S.; HEWAGE, K.; WIRASINGHE, C.; CHHIPI-SHRESTHA, G.; KARUNATHILAKE, H.; SADIQ, R. Transforming road freight transportation from fossils to hydrogen: Opportunities and challenges. **International Journal of Sustainable Transportation**, Taylor & Francis, v. 17, n. 5, p. 552–572, 2023.

WULF, C.; HAASE, M.; BAUMANN, M.; ZAPP, P. Weighting factor elicitation for sustainability assessment of energy technologies. **Sustainable energy & fuels**, Royal Society of Chemistry, v. 7, n. 3, p. 832–847, 2023.

WULF, C.; HAASE, M.; BAUMANN, M.; ZAPP, P. Weighting factor elicitation for sustainability assessment of energy technologies. **Sustainable Energy & Fuels**, Royal Society of Chemistry, v. 7, n. 3, p. 832–847, 2023.

YANNIS, G.; KOPSACHEILI, A.; DRAGOMANOVITS, A.; PETRAKI, V. State-of-the-art review on multi-criteria decision-making in the transport sector. **Journal of traffic and transportation engineering (English edition)**, Elsevier, v. 7, n. 4, p. 413–431, 2020.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.

ZHAO, J.; PATWARY, A. K.; QAYYUM, A.; ALHARTHI, M.; BASHIR, F.; MOHSIN, M.; HANIF, I.; ABBAS, Q. The determinants of renewable energy sources for the fueling of green and sustainable economy. **Energy**, Elsevier, v. 238, p. 122029, 2022.