

**AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DO POTENCIAL DE INCORPORAÇÃO DE
BIOCOMBUSTÍVEIS AVANÇADOS NA MATRIZ DE BIOCOMBUSTÍVEL NACIONAL**

***Multicriteria Assessment of the Potential for Incorporating Advanced Biofuels into
the National Biofuel System***

Gabriela Vieira da Silva

Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP, Brasil

Juliana da Silveira Espindola

Universidade Federal do Rio Grande. Santo Antônio da Patrulha, RS, Brasil

Marcelo Aragão Escobar

Universidade Federal do Rio Grande. Santo Antônio da Patrulha, RS, Brasil

Guilherme Rafael Schuch

Universidade Federal do Rio Grande. Santo Antônio da Patrulha, RS, Brasil

GT 12 - Impactos socioambientais das novas tecnologias no agronegócio

Resumo: A elevada dependência global de combustíveis fósseis, especialmente do petróleo, constitui um fator de vulnerabilidade para a segurança energética, tornando necessária a identificação de alternativas mais sustentáveis e resilientes. Nesse contexto, os biocombustíveis avançados de base lignocelulósica destacam-se como opções promissoras, embora sua adoção envolva desafios econômicos, tecnológicos, ambientais e sociais. Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar o potencial de diferentes rotas de biocombustíveis avançados no Brasil por meio da aplicação do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Foram considerados os biocombustíveis etanol lignocelulósico, biogás, diesel sintético, biogasolina e bioquerosene/SAF no estudo. A metodologia baseou-se na estruturação hierárquica do problema, definição de critérios e subcritérios, e realização de comparações par a par a partir do julgamento de especialistas. Os resultados indicam predominância do critério econômico na tomada de decisão, seguido pelos critérios tecnológico e ambiental, enquanto a dimensão social apresentou menor peso relativo. Na análise das alternativas, o etanol lignocelulósico e o biogás destacaram-se com os maiores escores globais, 34,29% e 30,97%, respectivamente, evidenciando maior potencial de viabilidade no contexto brasileiro. Os resultados reforçam a importância da competitividade econômica aliada ao desempenho tecnológico e ambiental para a consolidação dessas rotas, contribuindo para a diversificação da matriz energética e redução da dependência do petróleo.

Palavras-chave: Biocombustíveis avançados, análise multicritério, segurança energética, biomassa lignocelulósica.

Abstract: The high global dependence on fossil fuels, especially oil, constitutes a vulnerability factor for energy security, making it necessary to identify more sustainable and resilient alternatives. In this context, advanced lignocellulosic biofuels stand out as promising options, although their adoption involves economic, technological, environmental, and social challenges. Therefore, this study aims to evaluate the potential of different advanced biofuel routes in Brazil through the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) method. Lignocellulosic ethanol, biogas, synthetic diesel, biogasoline, and bio-kerosene/SAF biofuels were considered in the study. The methodology was based on the hierarchical structuring of the problem, definition of criteria and sub-criteria, and pairwise comparisons based on expert judgment. The results indicate a predominance of the economic criterion in decision-making, followed by the technological and environmental criteria, while the social dimension showed less relative weight. In the analysis of the alternatives, lignocellulosic ethanol and biogas stood out with the highest overall scores, 34.29% and 30.97%, respectively, demonstrating greater potential for viability in the Brazilian context. The results reinforce the importance of economic competitiveness combined with technological and environmental performance for the consolidation of these routes, contributing to the diversification of the energy matrix and reducing dependence on oil.

Keywords: Advanced biofuels, multicriteria analysis, energy security, lignocellulosic biomass.

1. Introdução

A crescente intensificação das mudanças climáticas e a elevada dependência global de combustíveis fósseis têm reforçado a necessidade de transição para fontes energéticas mais sustentáveis. Atualmente, os combustíveis fósseis ainda representam cerca de 80% da matriz energética mundial, evidenciando a centralidade do petróleo e a vulnerabilidade dos sistemas energéticos a choques econômicos e geopolíticos (International Energy Agency, 2023).

Nesse contexto, os biocombustíveis avançados, especialmente aqueles produzidos a partir de biomassa lignocelulósica, destacam-se como alternativas promissoras para diversificação da matriz energética, redução de emissões e fortalecimento da segurança energética. No entanto, a multiplicidade de rotas tecnológicas e os diferentes níveis de maturidade, custo e impacto socioambiental tornam a tomada de decisão complexa.

Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar o potencial de biocombustíveis avançados no Brasil por meio do método AHP, considerando critérios econômicos, tecnológicos, ambientais e sociais, a fim de identificar as alternativas mais promissoras no contexto nacional.

2. Revisão da Literatura

2.1 Segurança energética e dependência do petróleo

A segurança energética constitui um elemento central para o desenvolvimento econômico, sendo definida como a capacidade de garantir o fornecimento contínuo de energia a preços acessíveis (CHERP; JEWELL, 2014). No entanto, a elevada dependência global de combustíveis fósseis, responsáveis por cerca de 80% da matriz energética mundial, evidencia a vulnerabilidade dos sistemas energéticos contemporâneos (International Energy Agency, 2024).

Essa dependência é particularmente crítica no setor de transportes, no qual os derivados de petróleo predominam, limitando a flexibilidade de substituição no curto prazo. Nesse contexto, a volatilidade dos preços do petróleo, frequentemente associada a fatores geopolíticos, exerce impactos significativos sobre variáveis macroeconômicas, como inflação, custos de produção e crescimento econômico (TARKUN, 2025).

Eventos históricos, como a crise do petróleo de 1973 e conflitos recentes, reforçam a sensibilidade dos mercados energéticos a choques de oferta. Além disso, economias dependentes de importação de petróleo tendem a apresentar maior exposição a riscos

externos, ampliando a instabilidade econômica (SHEN, 2025). Dessa forma, a diversificação da matriz energética surge como estratégia essencial para redução dessa vulnerabilidade.

2.2 Alternativas energéticas e biocombustíveis avançados

Os biocombustíveis destacam-se como alternativas relevantes para substituição de combustíveis fósseis, podendo ser classificados em diferentes gerações. Os biocombustíveis de segunda geração, produzidos a partir de biomassa lignocelulósica, apresentam vantagens associadas ao aproveitamento de resíduos e à redução de conflitos com a produção de alimentos (RIVA *et al.*, 2025).

Os biocombustíveis destacam-se como alternativas relevantes para substituição de combustíveis fósseis, podendo ser classificados em diferentes gerações. Nesse contexto, os biocombustíveis avançados correspondem, principalmente, aos de segunda e terceira gerações, produzidos a partir de matérias-primas não alimentares, como biomassa lignocelulósica, resíduos agrícolas e algas, visando maior eficiência ambiental e menor competição com a produção de alimentos. Os biocombustíveis de segunda geração, em particular, apresentam vantagens associadas ao aproveitamento de resíduos e à redução de conflitos com a produção de alimentos (RIVA *et al.*, 2025).

No Brasil, o desenvolvimento desses combustíveis é estratégico, considerando a ampla disponibilidade de biomassa e a relevância do setor agroindustrial. Iniciativas como o RenovaBio e o Programa Combustível do Futuro (BRASIL, 2017; BRASIL, 2024) têm impulsionado a expansão de combustíveis renováveis, promovendo a descarbonização da matriz energética e incentivando a inovação tecnológica no setor.

Dentre os biocombustíveis, destacam-se diferentes rotas tecnológicas com aplicações específicas no setor energético. Nesse contexto, os biocombustíveis avançados, especialmente aqueles produzidos a partir de biomassa lignocelulósica, têm ganhado destaque devido ao seu potencial de sustentabilidade e ao aproveitamento de resíduos agroindustriais.

O etanol lignocelulósico é produzido a partir da conversão de materiais ricos em celulose e hemicelulose, como bagaço e palha de cana-de-açúcar, por meio de processos como pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação. Sua principal aplicação está na substituição parcial ou total da gasolina no setor de transportes. Entre suas vantagens destacam-se o elevado potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa e o

aproveitamento de resíduos agroindustriais (ZHANG; LI; WANG, 2023). No entanto, desafios relacionados ao custo enzimático, eficiência de conversão e complexidade do processo ainda limitam sua expansão em larga escala.

Já o biogás é gerado a partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, como dejetos animais, vinhaça e resíduos agroindustriais. Pode ser utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou, após purificação, como biometano para uso veicular (DIONISI; BOLZONELLA, 2021). Entre suas vantagens destacam-se a gestão adequada de resíduos, a redução de emissões de metano e a possibilidade de geração descentralizada de energia. Como desafios, destacam-se a necessidade de infraestrutura específica e a variabilidade na qualidade do biogás produzido.

A biogasolina é um combustível renovável obtido a partir de processos termoquímicos, como a pirólise e o craqueamento de biomassa, ou por rotas avançadas de conversão catalítica. Sua aplicação está associada à substituição direta da gasolina em motores convencionais. Entre suas vantagens estão a compatibilidade com a infraestrutura existente e o potencial de redução de emissões (International Energy Agency, 2023). No entanto, enfrenta desafios relacionados à complexidade tecnológica e aos elevados custos de produção.

O diesel sintético pode ser produzido a partir de biomassa por processos como gaseificação seguida de síntese *Fischer-Tropsch*. É utilizado como substituto do diesel fóssil em motores convencionais (BALAT, 2020). Suas principais vantagens incluem alta qualidade do combustível e menor emissão de poluentes. Entretanto, apresenta desafios relacionados ao alto investimento inicial, complexidade tecnológica e necessidade de escala para viabilização econômica.

O bioquerosene de aviação, também conhecido como *Sustainable Aviation Fuel* (SAF), é produzido a partir de diferentes rotas, como hidrocessamento de óleos vegetais e resíduos ou conversão de biomassa lignocelulósica. É utilizado na aviação como alternativa ao querosene fóssil, podendo ser misturado ao combustível convencional. Entre suas vantagens destacam-se a significativa redução das emissões de carbono e a compatibilidade com aeronaves existentes. Como principais desafios, destacam-se o elevado custo de produção e a necessidade de ampliação da escala produtiva (SANTOS; EICHHORN, 2020).

2.3 Método de decisão multicritério

A complexidade associada à avaliação de alternativas energéticas exige abordagens que considerem múltiplos critérios de forma integrada. Nesse contexto, métodos de decisão multicritério têm sido amplamente utilizados no planejamento energético, por permitirem a incorporação simultânea de dimensões econômicas, tecnológicas, ambientais e sociais.

Dentre esses métodos, destaca-se o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), desenvolvido por Saaty (1980), que tem se mostrado adequada para apoiar decisões complexas, especialmente em contextos que envolvem tecnologias emergentes e múltiplos trade-offs.

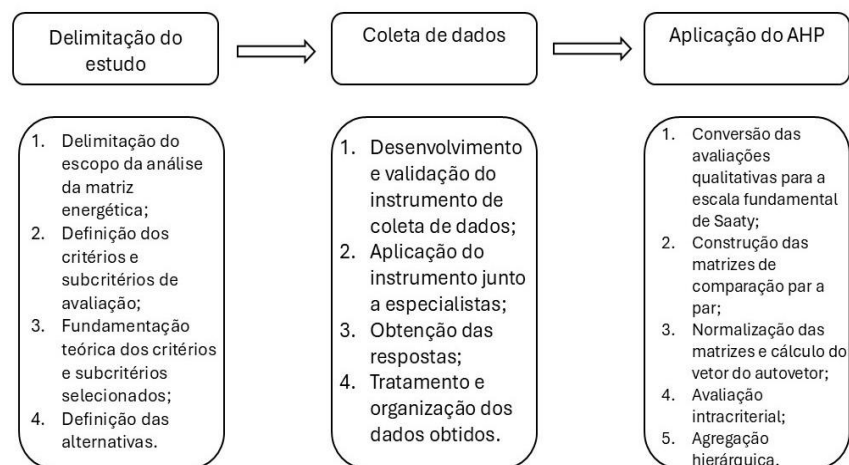
3. Metodologia

A pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem quali-quantitativa e caráter exploratório-analítico, tendo como objetivo a aplicação do método AHP na avaliação de biocombustíveis avançados produzidos a partir de biomassas lignocelulósicas, considerando critérios econômicos, tecnológicos, ambientais e sociais no contexto brasileiro. A escolha do AHP justifica-se por sua ampla aceitação em estudos de decisão multicritério, especialmente em temas de sustentabilidade que envolvem critérios tangíveis e intangíveis.

O componente qualitativo decorre da coleta de julgamentos de especialistas, envolvendo percepções técnicas e estratégicas sobre critérios e alternativas. O componente quantitativo está associado à modelagem matemática do AHP, que converte julgamentos subjetivos em pesos numéricos e permite a agregação hierárquica dos resultados, fundamentando-se na subjetividade estruturada.

A construção do estudo se deu em etapas, no qual pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 – Fluxo de procedimentos metodológicos para aplicação do AHP.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 Delimitação do escopo no contexto da matriz energética

A delimitação do estudo baseia-se na análise da matriz energética sob uma perspectiva aplicada, alinhada aos desafios da descarbonização, com ênfase no setor de transportes. Nesse contexto, os biocombustíveis são estratégicos, especialmente em modais de alta demanda energética e com limitações à eletrificação, como transporte rodoviário pesado, marítimo e aéreo (IPEA, 2022). No Brasil, essa relevância é ampliada pela participação histórica desses combustíveis na matriz energética e por políticas que incentivam a segurança energética e a redução de emissões. As limitações dos biocombustíveis convencionais, sobretudo quanto ao uso de terras agrícolas, têm impulsionado o interesse por alternativas lignocelulósicas, baseadas em resíduos e com maior potencial de expansão sustentável.

Assim, o recorte adotado alinha-se às demandas globais de descarbonização e às diretrizes nacionais de transição energética, como a RenovaBio e o programa Combustível do Futuro, que incentivam a expansão de combustíveis renováveis e a redução da intensidade de carbono na matriz energética brasileira. Além disso, considera-se o elevado potencial técnico da biomassa no país, permitindo uma análise mais consistente e alinhada às estratégias de descarbonização do setor energético (BRASIL, 2017; BRASIL, 2024).

Para a aplicação do método, foi construído um embasamento teórico sobre biocombustíveis, rotas tecnológicas e níveis de maturidade, a partir de consultas em bases

como ScienceDirect, Wiley, IOP Science e PubMed, além de dissertações e teses, com foco em publicações entre 2018 e 2025.

3.2 Escolha dos critérios e sub-critérios

A seleção dos critérios e subcritérios está alinhada aos objetivos das políticas brasileiras de biocombustíveis e às demandas de avaliações multicritério no contexto da transição energética e da bioeconomia sustentável. Diretrizes como a RenovaBio (BRASIL, 2017) reforçam a integração de aspectos econômicos, sociais, ambientais e tecnológicos, que foram adotados como critérios principais neste estudo.

No critério social, políticas como o PNPB (BRASIL, 2024) justificam a inclusão dos subcritérios Impactos na comunidade e desenvolvimento regional (ICDR) e Geração de empregos (GE). No critério ambiental, com base na avaliação de ciclo de vida e mitigação de emissões, foram considerados Emissões de gases poluentes (EGP), Uso de recursos naturais (URN) e Geração de resíduos (GR).

O critério tecnológico fundamenta-se em políticas como a Lei do Combustível do Futuro (BRASIL, 2024), incluindo os subcritérios Nível de TRL (TRL), Complexidade da rota tecnológica (CRT) e Exigência de infraestrutura (EI). Já o critério econômico, com base em EPE (2019), contempla Custos de produção (CP) e Atração de investimentos (AI).

3.3 Escolha das alternativas

As alternativas avaliadas foram selecionadas com base no uso de biomassa lignocelulósica, considerando rotas compatíveis com o conceito de biocombustíveis avançados e com a realidade brasileira. Foram incluídos: etanol lignocelulósico, biogás, biogasolina, diesel sintético e bioquerosene/SAF, por representarem diferentes rotas tecnológicas, níveis de maturidade e aplicações nos setores de transporte leve, pesado e aviação. Foram excluídos biocombustíveis de primeira geração, combustíveis não biogênicos e alternativas baseadas em matérias-primas não lignocelulósicas, como resíduos urbanos e microalgas, por não se enquadrarem no escopo do estudo.

Essa seleção permite comparar diferentes rotas bioquímicas e termoquímicas, capturando contrastes tecnológicos e avaliando de forma abrangente seu potencial de inserção na matriz energética brasileira.

3.4 Coleta de dados e pré-tratamento dos dados

O método AHP utiliza o julgamento de especialistas para definir os pesos dos critérios, subcritérios e alternativas, incorporando conhecimento técnico ao processo decisório e reduzindo a subjetividade individual pela consolidação de múltiplas percepções (ISHIZAKA; LABIB, 2011). Os julgamentos dos especialistas foram coletados por meio de questionário estruturado com escala Likert, no qual os especialistas classificaram a relevância dos critérios, subcritérios e alternativas em escala de 1 (nada relevante) a 5 (muito relevante). O instrumento de coleta foi um formulário eletrônico na plataforma Google Forms.

Os dados da escala Likert foram então tratados para adequação à escala de Saaty, etapa reconhecida como pré-processamento para garantir compatibilidade metodológica (ISHIZAKA; LABIB, 2011). Considerando a ausência de julgamentos extremos e a baixa dispersão das médias, optou-se por restringir a escala ao intervalo de 1 a 5, visando aumentar a capacidade de discriminação e a estabilidade dos resultados. A conversão foi realizada por normalização linear (min-max), conforme a Equação 3.1:

$$s_i = 1 + \frac{(L_i - L_{min})}{(L_{min} - L_{max})} \times (5 - 1) \quad (3.1)$$

em que s_i representa o valor correspondente na escala de Saaty para o critério i , L_i corresponde à média das respostas na escala Likert atribuídas ao critério i , e L_{min} e L_{max} representam, respectivamente, os valores mínimo e máximo observados entre as médias Likert, e o fator multiplicativo decorre da amplitude do intervalo adotado da escala de Saaty, preservando a proporcionalidade e a hierarquia dos julgamentos, sem introduzir intensidades não observadas.

3.5 Matrizes de comparação par a par

O cálculo dos pesos relativos de critérios, subcritérios e alternativas, e a determinação das prioridades no modelo AHP foi feito a partir das matrizes de comparação par a par. Após a conversão das avaliações da escala Likert para a escala fundamental de Saaty, o grau de importância relativa entre os elementos foi determinado a partir da diferença entre as médias das avaliações dos especialistas, acrescida de uma unidade para adequação à escala de Saaty. Como essa escala não admite valores decimais,

os resultados foram arredondados para o inteiro mais próximo.

Após a construção das matrizes de comparação par a par, procedeu-se a etapa de

normalização das matrizes, cujo objetivo é transformar os valores absolutos de comparação em pesos relativos comparáveis. A normalização foi realizada por meio do método clássico proposto por Saaty (SAATY, 1977), que consiste na divisão de cada elemento da matriz pelo somatório dos elementos da respectiva coluna. Considerando uma matriz de comparação par a par $A = [a_{ij}]$ em que a_{ij} representa o grau de importância do elemento i em relação ao elemento j , a matriz normalizada é obtida conforme a Equação 3.2:

$$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (3.2)$$

Nesse procedimento, cada coluna da matriz normalizada passa a apresentar soma unitária, garantindo que os valores expressos representam proporções relativas. A partir da matriz normalizada, o vetor de pesos é determinado pelo cálculo da média aritmética dos elementos de cada linha, conforme apresentados na equação 3.3:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n n_{ij} \quad (3.3)$$

em que w_i representa o peso relativo associado ao elemento i e n corresponde ao número de elementos comparados na matriz

3.6 Agregação dos resultados

A etapa de agregação dos resultados permite obter a síntese das prioridades ao longo dos diferentes níveis hierárquicos do modelo AHP e o ranking final das alternativas (SAATY, 2008). Nessa etapa, o desempenho de cada alternativa é avaliado de forma global, considerando simultaneamente sua contribuição em todos os subcritérios e a importância relativa atribuída a cada critério e subcritério no processo decisório.

Para uma dada alternativa, o peso associado a cada subcritério é inicialmente ponderado pelo peso do respectivo subcritério e, em seguida, pelo peso do critério ao qual esse subcritério está vinculado. Dessa forma, cada alternativa apresenta uma contribuição parcial em cada subcritério, refletindo tanto seu desempenho local quanto a relevância hierárquica desse subcritério no modelo. O peso total da alternativa no processo decisório, denominado escore global, é obtido pela soma dessas contribuições ponderadas em todos os subcritérios considerados, totalizando dez subcritérios no modelo proposto.

Matematicamente, o escore global, $P_{(a_i)}$ de uma alternativa a_i pode ser

expresso pela soma das contribuições ponderadas ao longo da hierarquia, conforme Equação 3.4. Nessa formulação, W_{c_k} representa o peso do critério c_k , $w_{s_{kj}|c_k}$ corresponde ao peso do subcritério s_{kj} dentro do critério c_k e $p_{i|s_{kj}}$ indica o peso da alternativa a_i no subcritério s_{kj} (SAATY, 2008).

$$P_{(a_i)} = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{n_k} (w_{c_k} \cdot w_{s_{kj}|c_k} \cdot p_{i|s_{kj}}) \quad (3.4)$$

O escore global obtido por meio dessa agregação permite ordenar as alternativas em função de sua viabilidade global, resultando no ranking final dos biocombustíveis avaliados. Assim, a alternativa que apresenta o maior valor de $P_{(a_i)}$ é considerada aquela com maior potencial de inserção no contexto analisado, considerando critérios econômicos, tecnológicos, ambientais e sociais definidos no modelo.

3.7 Verificação da consistência dos julgamentos no AHP

No método AHP, a coerência lógica dos julgamentos expressos nas matrizes de comparação par a par é avaliada por meio da verificação da consistência, etapa fundamental para assegurar a confiabilidade dos pesos obtidos (SAATY, 1977). A consistência dos julgamentos é analisada a partir de um parâmetro que expressa o desvio da matriz em relação a uma situação de consistência perfeita. Esse parâmetro é obtido a partir da interação entre a matriz de comparação par a par A e o vetor de pesos w , conforme apresentado na Equação 3.5, sendo utilizado como base para o cálculo dos indicadores de consistência do método.

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A_w)_i}{w_i} \quad (3.5)$$

em que A representa a matriz de comparação par a par, w corresponde ao vetor de pesos normalizados, $(A_w)_i$ é o i -ésimo elemento do produto matricial entre a matriz e o vetor de pesos, e n representa a ordem da matriz (ISHIZAKA; LABIB, 2011). O valor obtido expressa o grau de coerência global dos julgamentos, sendo posteriormente empregado na determinação do índice e da razão de consistência. A partir desse parâmetro, calcula-se o Índice de Consistência (CI), que quantifica o nível de inconsistência presente na matriz de comparação, conforme a Equação 3.6.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.6)$$

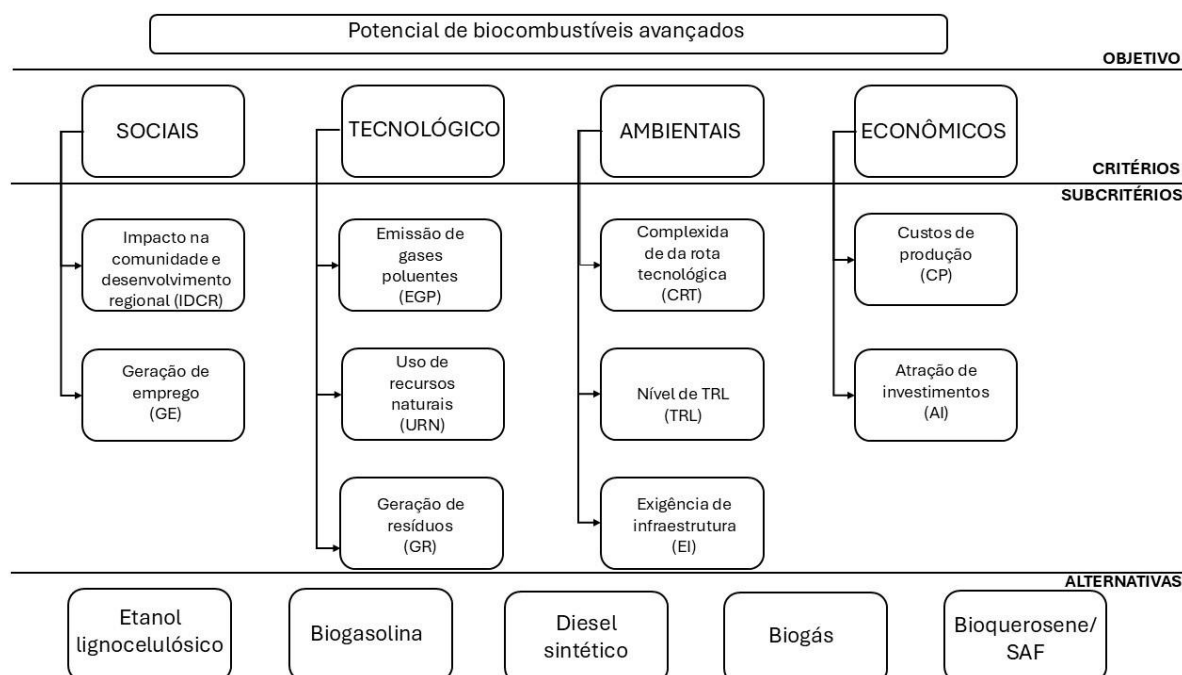
O Índice de Consistência é então comparado ao Índice Aleatório (RI), resultando na Razão de Consistência (CR), apresentada na Equação 3.7. O Índice Aleatório (RI) corresponde ao valor médio do índice de consistência obtido a partir de matrizes de comparação par a par geradas aleatoriamente, sendo utilizado como referência para avaliar se o nível de inconsistência observado em uma matriz real é aceitável (SAATY, 1977). De acordo com o critério estabelecido na literatura, valores de $CR \leq 0,10$ (10%) indicam um nível de consistência considerado aceitável (SAATY, 2008), enquanto valores superiores sugerem incoerências nos julgamentos que podem comprometer a confiabilidade dos resultados.

4. Análise de Resultados

4.1 Rede hierárquica

A construção da rede hierárquica do método AHP representa uma etapa fundamental deste estudo, pois estabelece a base conceitual e analítica sobre todo o processo de avaliação multicritério desenvolvido. A rede obtida nesse trabalho organiza o problema em diferentes níveis hierárquicos com o propósito de identificar o biocombustível com maior potencial e desdobrando-se em quatro critérios: econômico, tecnológico, ambiental e social; os quais são recorrentes em estudos de avaliação de sustentabilidade energética. Cada critério foi detalhado em subcritérios específicos, conforme Figura 2, onde no nível superior encontra-se o objetivo geral do estudo, no nível intermediário estão dispostos os critérios de avaliação desdobrados em seus respectivos subcritérios. Na base hierárquica posicionam-se as cinco alternativas de biocombustíveis analisadas.

Figura 2 – Rede hierárquica AHP para avaliação multicritério.



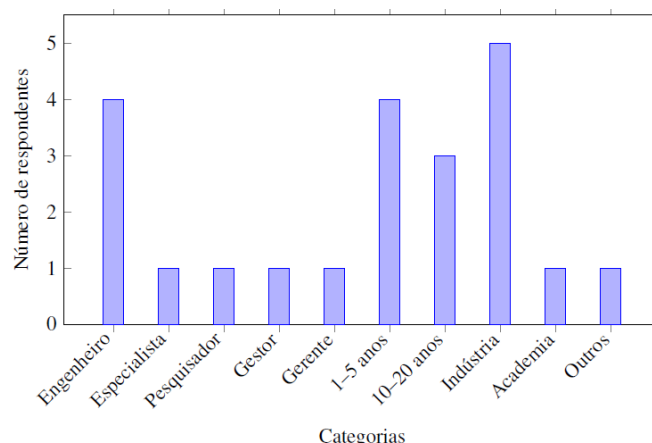
Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Perfil do respondente

O painel de especialistas foi composto por sete respondentes selecionados por amostragem intencional, todos com experiência mínima de cinco anos nas áreas de energia, biocombustíveis e processos industriais. Embora a taxa de resposta tenha sido de 21,2%, 7 de 33 convidados, o tamanho do painel é consistente com aplicações do método AHP, que priorizam a qualificação técnica dos avaliadores em detrimento do tamanho amostral.

O grupo apresentou elevado nível de formação, com participação de graduados, especialistas e doutores, garantindo robustez aos julgamentos realizados. O painel de especialistas apresentou diversidade de atuação profissional, exemplificado no Figura 3, incluindo funções técnicas e gerenciais em organizações públicas e privadas. Essa heterogeneidade é relevante em aplicações do AHP, pois diferentes níveis de atuação influenciam a percepção dos critérios, contribuindo para uma análise mais abrangente do problema decisório. Observou-se predominância de profissionais vinculados ao setor energético, com experiência prática em desenvolvimento tecnológico e avaliação de sistemas, o que reforça o caráter aplicado dos julgamentos realizados.

Figura 3 – Perfis dos especialistas participantes.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 Análise dos pesos globais dos critérios

Os pesos globais dos critérios foram obtidos por meio do método AHP, a partir das matrizes de comparação par a par agregadas dos especialistas. A Tabela 3 apresenta a importância relativa atribuída às dimensões econômica, tecnológica, ambiental e social no processo decisório.

Tabela 3 – Pesos globais dos critérios avaliados.

Critério	Peso global (%)
Ambiental	24,6
Econômico	43,8
Técnico	24,6
Social	7,00
CR	1,00

Fonte: Elaborado pela autora.

A análise dos pesos globais evidencia a predominância da dimensão econômica no processo decisório, indicando que fatores relacionados à viabilidade financeira, como custo de produção, atratividade de investimentos e competitividade de mercado, exercem maior influência na priorização das alternativas. Esse resultado sugere que, no contexto brasileiro, a adoção de biocombustíveis avançados está fortemente condicionada à sua capacidade de inserção econômica no sistema energético, refletindo um cenário em que restrições de custo e necessidade de retorno financeiro permanecem determinantes para a consolidação de novas rotas tecnológicas. Os critérios tecnológico e ambiental apresentaram pesos equivalentes, configurando um segundo nível de relevância na estrutura hierárquica do modelo. Tal proximidade reforça a interdependência entre essas dimensões no contexto dos

biocombustíveis avançados, nos quais avanços tecnológicos tendem a estar associados a ganhos ambientais. Por sua vez, o critério social apresentou menor peso relativo, o que pode ser explicado pela maior dificuldade de mensuração direta de seus impactos e por sua dependência indireta de fatores econômicos e tecnológicos. Benefícios sociais, como geração de emprego e desenvolvimento regional, tendem a se materializar a partir da viabilização econômica e da consolidação tecnológica das rotas produtivas, o que justifica sua menor priorização nas comparações realizadas pelos especialistas.

4.4 Importância relativa dos subcritérios

O procedimento para obtenção da importância relativa dos subcritérios deu-se no mesmo método que a análise dos pesos globais e os resultados evidenciam padrões distintos de priorização entre os critérios, evidenciados na Tabela 4.

Tabela 4 – Estrutura hierárquica e pesos dos critérios e subcritérios.

Critério	Subcritério	Peso do subcritério
Ambiental (24,59 %)	Emissão de gases poluentes (EGP)	20,1 %
	Uso de recursos naturais (URN)	11,8 %
	Geração de resíduos (GR)	68,1 %
Econômico (43,82 %)	Custo de produção (CP)	75,0 %
	Atração de investimentos (AI)	25,0 %
Tecnológico (24,59 %)	Nível de maturidade (TRL)	56,8 %
	Complexidade da rota (CRT)	33,4 %
	Exigência de infraestrutura (EI)	9,8 %
Social (7,00 %)	Geração de empregos (GE)	50,0 %
	Impacto e desenvolvimento regional (ICDR)	50,0 %

Fonte: Elaborada pela autora.

Em conjunto, os resultados evidenciam uma orientação decisória voltada a fatores operacionais e econômicos, reforçando o caráter pragmático da avaliação dos biocombustíveis avançados no contexto brasileiro.

4.5 Avaliação intracriterial das alternativas

A Tabela 5 apresenta a matriz consolidada com os pesos relativos das alternativas em cada dimensão analisada.

Tabela 5 – Pesos das alternativas em relação aos subcritérios avaliados.

Alternativa	CP	AI	TRL	CRT	EI	EGP	URN	GR	GE	ICDR
Etanol	0,48	0,42	0,29	0,22	0,37	0,28	0,19	0,21	0,24	0,30
Biogasolina	0,21	0,06	0,07	0,14	0,11	0,11	0,19	0,21	0,07	0,08
Diesel Sintético	0,12	0,01	0,12	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,24	0,45
Biogás	0,12	0,26	0,44	0,48	0,37	0,43	0,46	0,48	0,39	0,08
Bioquerosene/SAF	0,07	0,16	0,07	0,079	0,07	0,11	0,11	0,12	0,07	0,08
CR	0,012	0,015	0,012	0,013	0,008	0,012	0,013	0,012	0,006	0,008

Nota: CP – Custo de produção; AI – Atração de investimentos; TRL – Nível de maturidade tecnológica; CRT – Complexidade da rota tecnológica; EI – Exigência de infraestrutura; EGP – Emissão de gases poluentes; URN – Uso de recursos naturais; GR – Geração de resíduos; GE – Geração de empregos; ICDR – Impactos na comunidade e desenvolvimento regional.

Fonte: Elaborada pela autora.

A partir dos resultados, observa-se que o etanol lignocelulósico apresenta desempenho superior na maioria dos subcritérios, especialmente nos aspectos econômicos e operacionais, como custo de produção e atração de investimentos. O biogás se destaca nos subcritérios ambientais e sociais, com maiores pesos em geração de resíduos, emissões e geração de empregos, além de elevada maturidade tecnológica. O diesel sintético apresenta melhor desempenho relativo em impactos na comunidade e desenvolvimento regional, enquanto a biogasolina e o bioquerosene/SAF apresentam, de modo geral, desempenhos intermediários entre os subcritérios avaliados.

De forma geral, os resultados evidenciam diferenças relevantes no desempenho das alternativas ao longo das dimensões analisadas. As matrizes apresentaram níveis adequados de consistência ($CR < 10\%$), assegurando a confiabilidade dos julgamentos.

4.6 Agregação hierárquica de alternativas

A Tabela 6 apresenta a agregação hierárquica dos resultados, integrando os pesos dos critérios, subcritérios e o desempenho das alternativas.

Tabela 6 – Desempenho das alternativas nos critérios e subcritérios.

	Ambiental			Econômico		Técnico			Social	
Peso do Critério (%)	24,6			43,8		24,6			7,0	
Subcritério	EGP	URN	GR	CP	AI	TRL	CRT	EI	ICDR	GE
Peso do Subcritério (%)	20,1	11,8	68,1	75,0	25,0	56,8	33,4	9,8	50,0	50,0
Peso Global (%)	4,95	2,90	16,74	32,87	10,96	13,96	8,21	2,41	3,50	3,50
Etanol	0,28	0,19	0,21	0,48	0,42	0,57	0,33	0,10	0,24	0,30
Biogasolina	0,11	0,19	0,12	0,21	0,06	0,074	0,14	0,11	0,07	0,08
Diesel Sintético	0,07	0,07	0,07	0,12	0,10	0,12	0,08	0,07	0,24	0,45
Biogás	0,43	0,46	0,48	0,12	0,26	0,44	0,48	0,37	0,39	0,08
Bioquerosene/SAF	0,11	0,11	0,12	0,07	0,16	0,07	0,08	0,07	0,07	0,08

Fonte: Elaborada pela autora.

A partir dessa agregação hierárquica, foi possível elencar as alternativas de biocombustíveis com base em seus valores finais, sendo apresentada na Tabela 7, o ranking em ordem decrescente das alternativas mais promissoras que apresentou maior valor agregado.

Tabela 7 – Resultado final e ranking das alternativas de biocombustíveis.

Posição	Alternativa	Escore (%)
1º	Etanol	34,29
2º	Biogás	30,97
3º	Biogasolina	13,66
4º	Diesel sintético	11,74
5º	Bioquerosene/SAF	9,35

Fonte: Elaborada pela autora.

4.7 Análise crítica e interpretação dos resultados

Os resultados do ranking evidenciam a predominância de fatores econômicos na priorização dos biocombustíveis avançados, refletindo um contexto em que a viabilidade financeira constitui o principal condicionante para a adoção de novas rotas tecnológicas no Brasil. A posição de destaque do etanol lignocelulósico (34,29%) e do biogás (30,97%) está associada à maior maturidade tecnológica e à percepção de menor risco econômico, fatores determinantes para a difusão de tecnologias energéticas emergentes no setor agroindustrial.

No contexto do agronegócio, essas rotas apresentam vantagens adicionais relacionadas ao aproveitamento de resíduos lignocelulósicos e subprodutos

agroindustriais, o que contribui para a redução de passivos ambientais e para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa. Esse aspecto reforça o papel dessas tecnologias como estratégias de valorização da biomassa e de promoção de sistemas produtivos mais sustentáveis.

A diferença expressiva entre essas alternativas e as demais indica uma clara hierarquização no modelo, na qual rotas mais consolidadas e com maior viabilidade prática apresentam vantagem competitiva. Em contraste, biogasolina (13,66%), diesel sintético (11,74%) e bioquerosene/SAF (9,35%) apresentam desempenho inferior, possivelmente em função de maiores desafios associados a custo, complexidade tecnológica e infraestrutura.

Esse comportamento é consistente com estudos que apontam que, em economias em desenvolvimento, critérios econômicos tendem a se sobrepor a aspectos ambientais e sociais na tomada de decisão energética (FALCONE, 2023).

No entanto, a menor relevância atribuída aos critérios sociais pode indicar uma limitação do modelo, especialmente no contexto do agronegócio, onde impactos como geração de renda, emprego e inclusão produtiva no meio rural tendem a ocorrer de forma indireta e são de difícil mensuração.

Do ponto de vista prático, os resultados sugerem que políticas públicas voltadas à redução de custos e ao aumento da competitividade das rotas menos consolidadas podem ser determinantes para ampliar sua participação na matriz energética. Além disso, o fortalecimento de instrumentos de incentivo tecnológico e de valorização de externalidades ambientais e sociais pode contribuir para reduzir as diferenças observadas entre as alternativas, promovendo uma transição energética mais equilibrada e sustentável no setor agroindustrial.

Dessa forma, os resultados evidenciam que a incorporação de critérios socioambientais na avaliação de biocombustíveis avançados é fundamental para orientar decisões mais alinhadas aos desafios contemporâneos do agronegócio sustentável, especialmente em contextos de transição energética.

5. Considerações finais

Os resultados evidenciaram a predominância da dimensão econômica no processo decisório, indicando que a viabilidade financeira permanece como principal fator condicionante para a adoção de novas rotas tecnológicas.

O ranking obtido destacou o etanol lignocelulósico e o biogás como as alternativas mais promissoras, refletindo sua maior maturidade tecnológica e competitividade econômica em relação às demais rotas avaliadas. Em contraste, alternativas como biogasolina, diesel sintético e bioquerosene/SAF apresentaram menor desempenho, sugerindo a necessidade de avanços tecnológicos e redução de custos para sua consolidação.

Do ponto de vista prático, os resultados indicam que políticas públicas voltadas ao fortalecimento da competitividade econômica e ao incentivo à inovação tecnológica são fundamentais para ampliar a participação dos biocombustíveis avançados na matriz energética brasileira. Além disso, os achados reforçam a importância de estratégias integradas que considerem simultaneamente viabilidade econômica, desempenho ambiental e maturidade tecnológica.

Como limitações, destaca-se a dependência de julgamentos especializados no método AHP, bem como a restrição do número de especialistas participantes. Nesse sentido, estudos futuros podem ampliar o número de respondentes, incorporar novos critérios ou aplicar outras abordagens multicritério, de forma a complementar e validar os resultados obtidos.

Referências

- CHERP, A.; JEWELL, J. The concept of energy security: beyond the four As. *Energy Policy*, v. 75, p. 415–421, 2014.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). *Desenvolvimento sustentável no Brasil*. Brasília: Ipea, 2022.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Renewables 2024: analysis and forecast to 2030*. Paris: IEA, 2024.
- ISHIZAKA, A.; LABIB, A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, v. 38, p. 14336–14345, 2011.
- SAATY, T. L. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill, 1980.
- SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, v. 1, n. 1, p. 83–98, 2008.
- TARKUN, S. The impact of oil supply surprises on maritime transport. *Review of World Economics*, v. 161, p. 1501–1525, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10290-025-00596-2>.
- PIŁATOWSKA, M. et al. Macroeconomic effects of oil price shocks in the context of geopolitical events: evidence from selected European countries. *Energies*, v. 18, n. 15, 2025.
- RIVA, M.; CECCHIN, D.; PAES, J. L.; SIQUEIRA, G. B. Potencial dos resíduos de *Agave sisalana* na produção de biocombustíveis de segunda geração: revisão sistemática. *Revista Sítio Novo*, Palmas, v. 9, p. e1686, 2025. DOI: <https://doi.org/10.47236/2594-7036.2025.v9.1686>.
- BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 27 dez. 2017.
- BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Institui o Programa Combustível do Futuro e dispõe sobre a promoção de combustíveis sustentáveis no Brasil. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2024.
- FALCONE, P. M. Sustainable energy policies in developing countries: a review of challenges and opportunities. *Energies*, v. 16, n. 18, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16186682>.
- SANTOS, F.; EICHHORN, S. J. Lignocellulosic biomass for bioethanol production: current perspectives, potential issues and future prospects. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 14, n. 3, p. 585–602, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/bbb.2084>.
- BALAT, M. Production of synthetic fuels from biomass via Fischer–Tropsch synthesis: a review. *Energy Conversion and Management*, v. 209, p. 112623, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112623>.
- DIONISI, D.; BOLZONELLA, D. Advances in anaerobic digestion for biogas production from agro-industrial residues. *Renewable Energy*, v. 168, p. 104–117, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.070>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Renewables 2024: analysis and forecast to 2028*. Paris: IEA, 2023.

ZHANG, Y.; LI, X.; WANG, L. Advances in lignocellulosic biomass conversion to biofuels: technologies and challenges. *Fuel*, v. 343, p. 127856, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127856>.

SHEN, Y. Revisiting the impact of oil price shocks on macroeconomic performance: direct and indirect effects. *Economic Analysis and Policy*, 2025.