



**Documento de Informações Sobre a Modelagem Multicritério e
Análise de Variáveis das Energias Renováveis Pela Petrobras**

Rio de Janeiro
Novembro de 2025

Contextualização

A transição energética consolidou-se como uma das principais agendas globais, exigindo novas formas de produção e consumo energético que sejam compatíveis com as metas de sustentabilidade e redução das emissões de gases de efeito estufa (Kabeyi e Olanrewaju, 2022). O desafio, entretanto, não se limita à substituição de fontes fósseis por renováveis, mas envolve também a tomada de decisões em um ambiente permeado por múltiplos critérios, econômicos, tecnológicos, sociais, ambientais e regulatórios, muitas vezes conflitantes entre si (Bandeiras *et al.*, 2025).

A partir disso, destaca-se o Plano Estratégico 2025–2029 da Petrobras (Petrobras, 2025a), que incorpora de maneira explícita a transição energética como um de seus eixos centrais. A companhia estabeleceu metas de descarbonização, incluindo a neutralidade de carbono até 2050, investimentos de US\$ 11,5 bilhões em iniciativas de baixo carbono e a expansão de fontes renováveis, como a geração eólica offshore e onshore, solar fotovoltaica, biorrefinaria e projetos de hidrogênio. Tais diretrizes reforçam a importância da diversificação da matriz energética brasileira e evidenciam a relevância de alinhar estratégias empresariais de grande porte com compromissos ambientais e sociais, fortalecendo a sinergia entre inovação tecnológica e sustentabilidade.

Nesse cenário, os métodos de Apoio Multicritério à Decisão (AMD) oferecem ferramentas robustas para apoiar gestores e formuladores de políticas na escolha de alternativas mais adequadas ao direcionamento estratégico. A literatura evidencia que técnicas multicritério têm sido amplamente aplicadas no setor energético, especialmente para avaliação e priorização de fontes renováveis, considerando a Atratividade tecnológica, regulatória e socioambiental (Sahoo *et al.*, 2025).

Neste contexto, o modelo híbrido SAPEVO-WASPAS-M, baseados nos métodos *Simple Aggregation of Preferences Expressed by Ordinal Vectors – Multi Decision Makers* (SAPEVO-M) e *Weighted Aggregated Sum Product Assessment* (WASPAS), supera limitações de análises convencionais, promovendo maior confiabilidade nos resultados e contribuindo para a priorização de alternativas em energias renováveis.

Modelagem Híbrida SAPEVO-WASPAS-M

O método SAPEVO-WASPAS-M, traz uma integração axiomática dos métodos SAPEVO-M e WASPAS, promovendo a análise de variáveis no âmbito das energias renováveis para direcionamento estratégico por parte da Petrobras.

O método SAPEVO-M (Gomes *et al.*, 2020) representa uma nova versão do método ordinal original SAPEVO (Gomes, Mury e Gomes, 1997) que possibilitava a avaliação de apenas um decisor. Essa versão evoluída estende o método a múltiplos decisores, além de introduzir um processo de normalização das matrizes de avaliação, incrementando a consistência do modelo.

O método consiste, basicamente, de dois processos. Primeiramente, deve ser realizada a transformação da preferência ordinal entre critérios, a ser expressa por um vetor representando os pesos. Em seguida, é feita a transformação ordinal da preferência entre alternativas dentro de um determinado conjunto de critérios, expressa por uma matriz. Uma série de comparações par a par entre as opções de critérios ou alternativas dentro de um determinado critério denotam as informações de preferência individual de cada decisor.

O Método WASPAS é uma técnica de tomada de decisão multicritério desenvolvida por Zavadskas *et al.* (2012) na Lituânia. É um método que combina o *Weighted Sum Model* (WSM) e o *Weighted Product Model* (WPM) por meio de um parâmetro lambda, visando ordenar alternativas em relação a múltiplos critérios, refletindo uma abordagem equilibrada que captura tanto a aditividade quanto a multiplicatividade das avaliações.

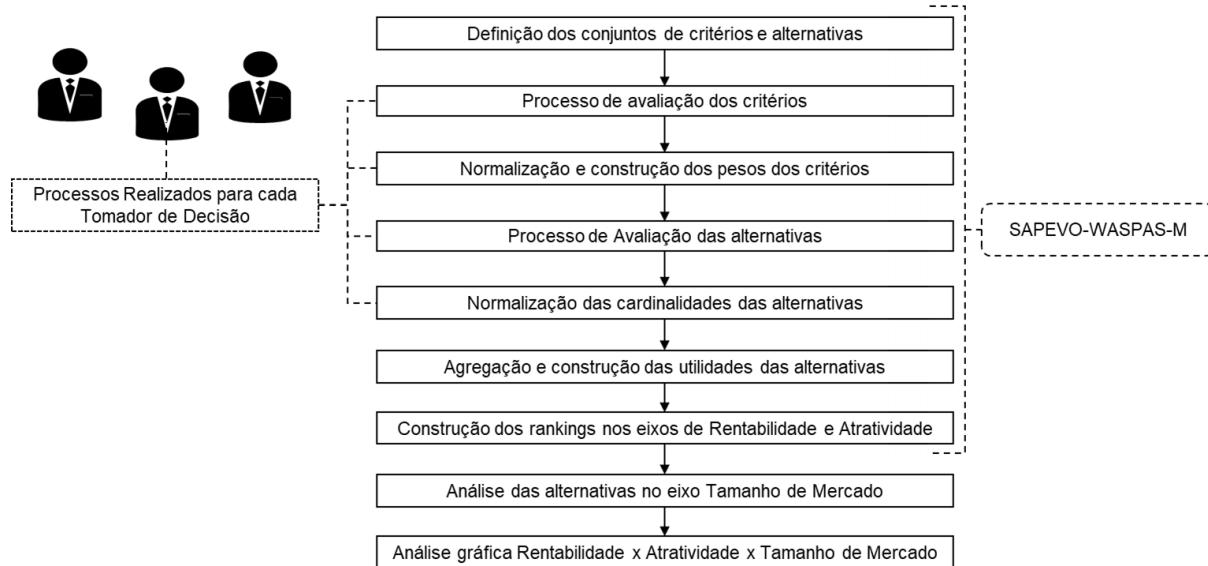
No que tange ao modelo SAPEVO-WASPAS-M, ele emprega as técnicas do método SAPEVO-M considerando comparação par a par para avaliação dos critérios e em um segundo momento utiliza-se do método WASPAS para avaliação das alternativas em cada um dos critérios elencados, seja nos eixos de Rentabilidade ou Atratividade. O modelo em questão possibilita a integração de múltiplos decisores em um processo de tomada de decisão assíncrono.

A dimensão Tamanho de Mercado, está integrada ao modelo como complemento às análises de Rentabilidade e Atratividade. Nesse eixo, são considerados fatores como o estágio atual do setor, o potencial de crescimento, o nível de competitividade, a presença de produtos substitutos, o contexto regulatório,

a concentração de mercado, entre outras perspectivas. Para a avaliação, o Tamanho de Mercado será representado por estimativas econômicas, ampliando a visão estratégica e permitindo comparar as alternativas a partir de sua relevância em participação de mercado.

Para o processo decisório, serão consideradas avaliações separadas para cada um dos eixos, ou seja, uma análise dos critérios e alternativas no eixo Rentabilidade e uma segunda análise das variáveis no eixo Atratividade. Neste contexto, ao final serão geradas duas priorizações das alternativas, sendo estas combinadas em um gráfico de desempenho Rentabilidade × Atratividade × Tamanho de Mercado. A Figura 1 traz uma esquematização do modelo proposto.

Figura 1 – Processo Axiomático do SAPEVO-WASPAS-M



Fonte: Petrobras (2025c)

Avaliação dos Critérios

Para avaliação dos critérios, considera-se uma escala de sete pontos que é empregada para mensurar, relativamente, a importância entre cada um. A partir da avaliação entre os critérios, é obtida uma matriz com a representação numérica correspondente. A relação entre a escala de preferência e o valor numérico é expressa na Tabela 1.

Tabela 1 – Escala dos critérios

Expressão Linguística	Pontuação
Absolutamente menos importante	-3
Muito menos importante	-2
Menos importante	-1
Tão importante quanto	0
Mais importante	1
Muito mais importante	2
Absolutamente mais importante	3

Fonte: Adaptado de (Gomes et al., 2020)

Seja D um conjunto de decisores (DM), em que $D = \{DM_1, DM_2, \dots, DM_k, \dots, DM_n\}$, os quais expressam suas opiniões sobre os critérios em ordem de preferência. Para um agente decisor DM_k , essas informações geram uma matriz M_{DM_k} .

Além disso, é previsto também, após o processo de integração dessa matriz, a normalização do vetor resultante na Equação (1), considerando a conversão das somas das atribuições $\sum v_{ij}$, permitindo uma transformação de pontuações ordinais em grandezas cardinais, proporcionando a agregação das preferências e ordenação das variáveis em caráter local e global.

$$v_j = \frac{\sum d_j - \text{soma mínima}}{\text{soma máxima} - \text{soma mínima}} \quad (1)$$

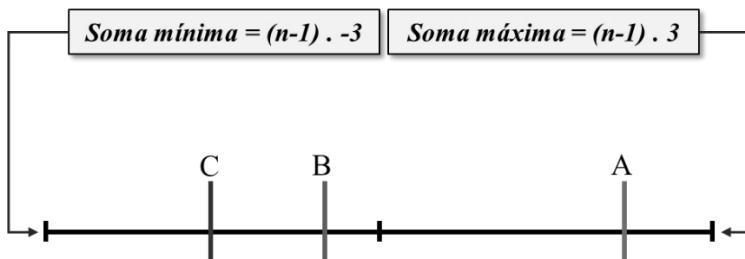
Nesse cenário de avaliação, utilizam-se duas variáveis de apoio, sendo elas nomeadas como *soma máxima* e *soma mínima*, expostas nas Equações (2) e (3). Tais variáveis expressam os valores máximos e mínimos possíveis na soma de uma linha para diferentes cenários. Para soma máxima, considera-se a possibilidade da pontuação 3 a todas as demais variáveis; já o valor de soma mínima considera a possibilidade da pontuação -3 em relação a todas as demais variáveis do conjunto.

$$soma\ máxima = (n - 1)3 \quad (2)$$

$$soma\ mínima = (n - 1)(-3) \quad (3)$$

Com o estabelecimento das cardinalidades v_j , é possibilitada a distribuição e estabelecimento de preferências em uma escala, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Distribuição das pontuações das variáveis com base nos limites máximos e mínimos



Fonte: Petrobras (2025c)

Seguindo a base axiomática exposta pela Figura 2, entende-se que os valores de *soma máxima* e *soma mínima* representam as extremidades da escala onde serão alocados os desempenhos individuais das variáveis conforme as pontuações obtidas. Nesse contexto, quanto mais próximo à pontuação de uma determinada variável estiver do valor de soma máxima, maior será o seu domínio no conjunto, porém, quanto menor for sua pontuação e mais próxima do valor de soma mínima, a variável representará pouca importância no conjunto.

Considerando as pontuações cardinais dos critérios, é possível esclarecer as relações de preferência para cada variável em cada contexto de avaliação, em que:

- $v_j = 0$, indica que não há preferência no critério j ;
- $v_j \cong 0$, indica que há uma fraca preferência no critério j ;
- $v_j \cong 1$, indica que há uma forte preferência no critério j ;
- $v_j = 1$, indica que há preferência estrita no critério j .

Com a construção das pontuações cardinais, os vetores prioridades dos critérios são obtidos pela normalização de cada valor, frente à divisão desse pelas somas das pontuações do conjunto, seguindo a Equação (4).

$$w_j = \frac{v_j}{\sum_i^n v_j} \quad (4)$$

O vetor gerado em (4) traz a representação dos pesos do critério frente ao seu conjunto, seja no eixo de Rentabilidade ou Atratividade.

Comumente entre os modelos que operam com avaliações par a par, faz-se necessária uma análise de consistência para compreender a relação de coesão relativa às atribuições realizadas, sempre levando em conta características de transitividade no processo decisório (Santos *et al.*, 2023).

Nesse contexto, utiliza-se uma dada proposta para avaliação de cada matriz par a par construída no processo decisório de avaliação dos critérios. Assim, considerando um conjunto de variáveis em uma matriz n dimensional, dada entrada é usada como base para o modelo de teste de consistência, utilizando sua diagonal superior para validação, como exposto na Tabela 2.

Tabela 2 – Matrizes de entrada para teste de consistência das avaliações par a par

	<u>Matriz de Entrada</u>						<u>Matriz Ideal Transitiva</u>				
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>n</i>		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>n</i>
<i>A</i>	-	a_{21}	a_{31}	a_{41}	a_{n1}		-	a_{21}	a_{31}	a_{41}	a_{n1}
<i>B</i>		-	a_{32}	a_{42}	a_{n2}		(-1) a_{21}	-	a_{ij}	a_{ij}	a_{ij}
<i>C</i>			-	a_{43}	a_{n3}		(-1) a_{31}		-	a_{ij}	a_{ij}
<i>D</i>				-	a_{n4}		(-1) a_{41}			-	a_{ij}
<i>n</i>					-		(-1) a_{n1}				-

Fonte: (Santos *et al.*, 2023)

Conforme demonstrado na Tabela 2, uma matriz nomeada como ideal transitiva é construída, tendo em sua base metodológica os preceitos dos modelos de preferências transitivas, servindo como referência para comparação e viabilização do teste de consistência. Sendo assim, os valores correspondentes são obtidos pela Equação (5).

$$a_{ij} = \begin{cases} -3 & se (a_{1j} + a_{i1}) \leq -3 \\ a_{1j} + a_{i1} & se -3 < (a_{1j} + a_{i1}) < 3 \\ 3 & se (a_{1j} + a_{i1}) \geq 3 \end{cases} \quad (5)$$

Realizando a avaliação de comparação entre a matriz de entrada e a matriz ideal transitiva, uma nova matriz é gerada, representando o resultado da comparação entre as duas anteriores, denominada como matriz de comparação e consistência, que é constituída por dados binários {0;1}. Obtendo a comparação entre as duas matrizes de entrada, caso a diferença entre os valores dos vetores varie entre {-1;1},

$a_{ij} = 0$, caso o obtido da diferença esteja fora dessa escala, $a_{ij} = 1$. Com base no processo axiomático, a Tabela 3 expõe um exemplo de uma possível matriz binária.

Tabela 3 – Matriz binária de comparação e consistência

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>n</i>
<i>A</i>	-	0	0	0	0
<i>B</i>		-	0	0	1
<i>C</i>			-	1	0
<i>D</i>				-	0
<i>n</i>					-

Fonte: (Santos *et al.*, 2023)

Para cada matriz binária construída, é obtida a soma das pontuações binárias, representada por $bp = \sum a_{ij}$. Com o valor de bp o cálculo de consistência é realizado mediante o número de atribuições realizadas em uma avaliação de comparação par a par, representado por $\frac{n(n-1)}{2}$. Com esses valores, é gerado o valor de consistência λ , representado na Equação (6).

$$\lambda = \frac{bp}{\left(\frac{n(n-1)}{2}\right)} \quad (6)$$

Obtido o valor de consistência, utiliza-se a Tabela 4 como forma de apoio e entendimento da relação de consistência obtida entre as comparações atribuídas nas avaliações par a par do modelo proposto.

Tabela 4 – Relações de Consistências

Consistência	Taxa de Inconsistência
Alta	0% - 10%
Média	11% - 20%
Baixa	21% - 30%
Inconsistente	31% - 40%
Muito Inconsistente	41% - 100%

Fonte: Adaptado de (Santos *et al.*, 2023)

Gerada a relação de consistência para cada matriz pertencente ao conjunto de avaliações de um dado problema, é possível esclarecer ao decisor um relativo direcionamento quanto sua consistência e assertividade nos estabelecimentos subjetivos atribuídos nas avaliações dos critérios do processo decisório.

Avaliação das Alternativas

Para avaliação das alternativas, considera-se uma escala *likert* de cinco pontos expressando o desempenho particular de cada alternativa em um respectivo critério. Diferente dos critérios, para a análise das alternativas, as descrições respectivas a cada pontuação da escala {1;5} são definidas de forma particular a cada critério. No Anexo A deste relatório, são apresentadas as definições dos sete critérios de Rentabilidade e sete critérios de Atratividade, assim como as respectivas descrições da escala *likert* presente para cada variável.

Nesse cenário, a avaliação das alternativas se inicia com a construção da matriz de decisão (7) contendo as pontuações de 1 a 5 para o conjunto de alternativas nos critérios de avaliação.

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{xn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para cada critério se realiza a normalização das pontuações das alternativas, tendo como base a Equação (8) como fator de normalização.

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}} \quad (8)$$

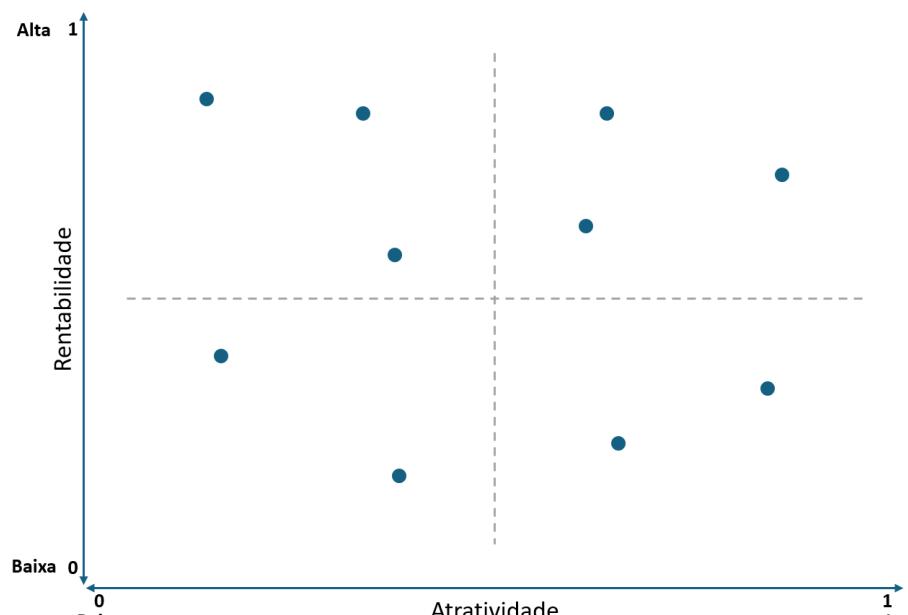
Por fim, a agregação das preferências será dada pela ponderação dos pesos dos critérios e pelos desempenhos das alternativas em cada critério, construindo, assim, a relação de desempenho global das alternativas, conforme indicado pela Equação (9). Seguindo a lógica de um modelo de ordenação, quanto maior for o valor da agregação de v_i , melhor será o desempenho global de uma dada alternativa ao processo de tomada de decisão.

$$v_i = \sum_{j=1}^m w_j a_{ij} \quad (9)$$

Tendo em consideração que o processo decisório da Petrobras opera com os eixos de Rentabilidade e Atratividade, será gerado uma avaliação e ordenação das alternativas para cada eixo, sendo estes combinados em uma análise gráfica Rentabilidade x Atratividade.

A Figura 3 traz uma exemplificação do formato de análise gráfica, contendo os eixos de Rentabilidade e Atratividade, apresentando desempenhos cardinais variando entre 0 e 1. Quanto menor a utilidade de uma alternativa no eixo Rentabilidade, isso significa que menos rentável será tal alternativa frente as demais, por outro lado, quanto mais próximo de 1, mais rentável se demonstra uma dada alternativa. Observação semelhante se apresenta para o eixo de Atratividade, quanto melhor sua pontuação, mais atrativa será tal alternativa.

Figura 3 – Exemplificação de resultado gráfico nos eixos Rentabilidade e Atratividade



Fonte: Petrobras (2025c)

Avaliação das Alternativas para Tamanho de Mercado

A avaliação da dimensão de Tamanho de Mercado é conduzida a partir de estimativas econômicas associadas à cada alternativa energética. Para cada alternativa i no período p , se considera um conjunto de valores de mercado, permitindo calcular a média, o desvio-padrão amostral e o intervalo de confiança da estimativa, mediante a formulação adotada expressa na Equação (10):

$$TM_{ip} = \bar{x}_{ip} \pm t_{\alpha/2, n-1} \times \frac{s_i}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

Em que:

- \bar{x}_{ip} é a média estimada do tamanho de mercado da alternativa i no período p ;
- s_i é o desvio-padrão amostral das estimativas;
- n representa o número de observações disponíveis;
- $t_{\alpha/2, n-1}$ é o valor crítico da distribuição t de Student com $n - 1$ graus de liberdade.

Essa abordagem fornece, para cada alternativa, uma faixa de valores de variabilidade associada às diferentes projeções de mercado. O resultado final é incorporado ao modelo multicritério como a dimensão de Tamanho de Mercado, representada graficamente pelo diâmetro relativo das circunferências no bolômetro de Rentabilidade × Atratividade × Tamanho de Mercado.

Estudo de Caso Hipotético

Para compreensão da aplicabilidade da modelagem SAPEVO-WASPAS-M, traz-se uma aplicação numérica hipotética, tendo em consideração um cenário de avaliação composto por três decisores (A, B e C).

Ressalta-se que os valores apresentados nas avaliações são totalmente hipotéticos, servindo apenas de validação matemática do modelo. Desta forma, um segundo estudo, considerando a participação de membros da Petrobras será conduzido no próximo relatório oportuno. As alternativas avaliadas neste relatório estão descritas na Tabela 5, que incluem um conjunto amplo de opções estratégicas definidas pela Petrobras (DTEN, 2024).

Tabela 5 – Alternativas Definidas pela Petrobras

Alternativas
Hidrogênio
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)
Solar
Eólica onshore
Eólica offshore
Nuclear
Geotermia
Biometano
Armazenamento de energia
Minerais críticos
Mobilidade elétrica
Biorrefino

Fonte: Adaptado (DTEN, 2024)

Os critérios considerados na aplicação estão listados na Tabela 6, que foram organizados nas dimensões Rentabilidade e Atratividade (DTEN, 2024). Eles englobam variáveis econômicas, tecnológicas, regulatórias e socioambientais, como margem de lucro, maturidade tecnológica, barreiras de entrada, sinergia com recursos do setor de óleo e gás, além de benefícios socioambientais alinhados à economia de baixo carbono.

Tabela 6 – Critérios Definidos pela Petrobras

Rentabilidade	Atratividade
Baixa concorrência (C1)	Conteúdo legal e regulatório (C1)
Demandas de mercado (C2)	Maturidade tecnológica (C2)
Baixo risco associado (C3)	Sinergia de recursos O&G (C3)
Conhecimento de mercado (C4)	Potenciais parcerias estratégicas (C4)
Margem de lucro (C5)	Disponibilidade de mão-de-obra capacitada (C5)
Barreiras de entrada (C6)	Cadeia de suprimento estabelecida (C6)
Baixa necessidade de investimento / incentivos governamentais (C7)	Benefício socioambiental e alinhamento à economia de baixo carbono (C7)

Fonte: Adaptado (DTEN, 2024)

Na dimensão de Tamanho de Mercado, a avaliação das alternativas foi realizada a partir de estimativas econômicas, porém considerando uma observação hipotética em respectivo às alternativas, operando validação numérica de modo a refletir a relevância econômica de cada alternativa no contexto hipotético.

O processo se inicia com a avaliação dos três decisores analisando os sete critérios quanto ao eixo de Rentabilidade, conforme exposto nas Tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7 – Avaliação dos Critérios de Rentabilidade - Decisor A

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Pontuação	Normalização	Pesos Individuais
C1	0	3	2	2	1	0	2	10	0,778	0,222
C2	-3	0	-1	-1	-2	-3	-1	-11	0,194	0,056
C3	-2	1	0	0	-1	-2	0	-4	0,389	0,111
C4	-2	1	0	0	-1	-2	0	-4	0,389	0,111
C5	-1	2	1	1	0	-1	1	3	0,583	0,167
C6	0	3	2	2	1	0	2	10	0,778	0,222
C7	-2	1	0	0	-1	-2	0	-4	0,389	0,111

Fonte: Petrobras (2025c)

Tabela 8 – Avaliação dos Critérios de Rentabilidade - Decisor B

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Pontuação	Normalização	Pesos Individuais
C1	0	2	1	2	1	1	2	9	0,750	0,214
C2	-2	0	-1	0	-1	-1	0	-5	0,361	0,103
C3	-1	1	0	1	0	0	1	2	0,556	0,159
C4	-2	0	-1	0	-1	-1	0	-5	0,361	0,103
C5	-1	1	0	1	0	0	1	2	0,556	0,159
C6	-1	1	0	1	0	0	1	2	0,556	0,159
C7	-2	0	-1	0	-1	-1	0	-5	0,361	0,103

Fonte: Petrobras (2025c)

Tabela 9 – Avaliação dos Critérios de Rentabilidade - Decisor C

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Pontuação	Normalização	Pesos Individuais
C1	0	1	1	3	1	0	2	8	0,722	0,206
C2	-1	0	0	2	0	-1	1	1	0,528	0,151
C3	-1	0	0	2	0	-1	1	1	0,528	0,151
C4	-3	-2	-2	0	-2	-3	-1	-13	0,139	0,040
C5	-1	0	0	2	0	-1	1	1	0,528	0,151
C6	0	1	1	3	1	0	2	8	0,722	0,206
C7	-2	-1	-1	1	-1	-2	0	-6	0,333	0,095

Fonte: Petrobras (2025c)

A consolidação dos pesos dos critérios de Rentabilidade é apresentada na Tabela 10. Os resultados agregados indicaram maior importância para os critérios de Baixa concorrência (C1), com peso final de 0,214, e Barreiras de entrada (C6), com 0,196. Em seguida, destacou-se o critério Margem de lucro (C5), com 0,159, enquanto os demais critérios apresentaram pesos intermediários ou menores, como Conhecimento de mercado (C4), com 0,085.

Tabela 10 – Pesos nos critérios de Rentabilidade

	Decisor A	Decisor B	Decisor C	Peso Final
C1	0,222	0,214	0,206	0,214
C2	0,056	0,103	0,151	0,103
C3	0,111	0,159	0,151	0,140
C4	0,111	0,103	0,040	0,085
C5	0,167	0,159	0,151	0,159
C6	0,222	0,159	0,206	0,196
C7	0,111	0,103	0,095	0,103

Fonte: Petrobras (2025c)

Dando sequência ao processo, se procede a avaliação das alternativas pelos três decisores no que tange seus respectivos desempenhos nos critérios de Rentabilidade, conforme apresentado nas Tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11 – Atribuição da Pontuação das Alternativas nos Critérios da Rentabilidade - Decisor A

Alternativas/Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hidrogênio	5	5	2	4	2	5	4
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	5	2	2	3	1	3	3
Solar	2	1	3	5	3	3	5
Eólica onshore	3	1	1	4	1	2	1
Eólica offshore	5	1	4	4	3	5	1
Nuclear	5	4	1	4	5	3	4
Geotermia	1	4	1	1	5	4	1
Biometano	1	1	5	1	4	2	1
Armazenamento de energia	4	5	3	2	3	5	4
Minerais críticos	5	5	3	1	1	1	1
Mobilidade elétrica	5	4	5	5	1	3	1
Biorrefino	1	1	2	5	2	4	1

Fonte: Petrobras (2025c)

Tabela 12 – Atribuição da Pontuação das Alternativas nos Critérios da Rentabilidade - Decisor B

Alternativas/Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hidrogênio	5	5	5	4	1	1	2
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	3	5	5	2	3	5	5
Solar	3	3	1	2	2	4	4
Eólica onshore	1	3	2	1	3	4	5
Eólica offshore	1	4	2	3	5	2	5
Nuclear	4	3	1	2	2	3	1
Geotermia	5	3	5	3	1	2	3
Biometano	3	1	1	5	3	4	2
Armazenamento de energia	5	4	3	1	1	2	4
Minerais críticos	2	5	2	1	4	5	4
Mobilidade elétrica	3	1	3	3	2	3	4
Biorrefino	3	4	2	3	2	1	2

Fonte: Petrobras (2025c)

Tabela 13 – Atribuição da Pontuação das Alternativas nos Critérios da Rentabilidade - Decisor C

Alternativas/Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hidrogênio	2	2	1	3	5	1	5
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	5	3	3	5	3	3	4
Solar	4	5	5	5	2	2	1
Eólica onshore	2	1	2	4	1	3	3
Eólica offshore	4	3	5	4	3	2	4
Nuclear	2	3	4	2	4	4	3
Geotermia	4	3	1	1	3	3	1
Biometano	5	3	1	3	4	1	5
Armazenamento de energia	5	4	3	5	4	3	1
Minerais críticos	4	3	2	3	3	4	2
Mobilidade elétrica	5	4	3	2	4	5	2
Biorrefino	2	5	5	5	2	4	2

Fonte: Petrobras (2025c)

Na sequência, as Tabelas 14, 15 e 16, apresentam os desempenhos normalizados das alternativas.

Tabela 14 – Normalização da Pontuação das Alternativas nos Critérios da Rentabilidade - Decisor A

Alternativas/Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hidrogênio	1	1	0,4	0,8	0,4	1	0,8
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	1	0,4	0,4	0,6	0,2	0,6	0,6
Solar	0,4	0,2	0,6	1	0,6	0,6	1
Eólica onshore	0,6	0,2	0,2	0,8	0,2	0,4	0,2
Eólica offshore	1	0,2	0,8	0,8	0,6	1	0,2
Nuclear	1	0,8	0,2	0,8	1	0,6	0,8
Geotermia	0,2	0,8	0,2	0,2	1	0,8	0,2
Biometano	0,2	0,2	1	0,2	0,8	0,4	0,2
Armazenamento de energia	0,8	1	0,6	0,4	0,6	1	0,8
Minerais críticos	1	1	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2
Mobilidade elétrica	1	0,8	1	1	0,2	0,6	0,2
Biorrefino	0,2	0,2	0,4	1	0,4	0,8	0,2

Fonte: Petrobras (2025c)

Tabela 15 – Normalização da Pontuação das Alternativas nos Critérios da Rentabilidade - Decisor B

Alternativas/Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hidrogênio	1	1	1	0,8	0,2	0,2	0,4
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	0,6	1	1	0,4	0,6	1	1
Solar	0,6	0,6	0,2	0,4	0,4	0,8	0,8
Eólica onshore	0,2	0,6	0,4	0,2	0,6	0,8	1
Eólica offshore	0,2	0,8	0,4	0,6	1	0,4	1
Nuclear	0,8	0,6	0,2	0,4	0,4	0,6	0,2
Geotermia	1	0,6	1	0,6	0,2	0,4	0,6
Biometano	0,6	0,2	0,2	1	0,6	0,8	0,4
Armazenamento de energia	1	0,8	0,6	0,2	0,2	0,4	0,8
Minerais críticos	0,4	1	0,4	0,2	0,8	1	0,8
Mobilidade elétrica	0,6	0,2	0,6	0,6	0,4	0,6	0,8
Biorrefino	0,6	0,8	0,4	0,6	0,4	0,2	0,4

Fonte: Petrobras (2025c)

Tabela 16 – Normalização da Pontuação das Alternativas nos Critérios da Rentabilidade - Decisor C

Alternativas/Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hidrogênio	0,4	0,4	0,2	0,6	1	0,2	1
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	1	0,6	0,6	1	0,6	0,6	0,8
Solar	0,8	1	1	1	0,4	0,4	0,2
Eólica onshore	0,4	0,2	0,4	0,8	0,2	0,6	0,6
Eólica offshore	0,8	0,6	1	0,8	0,6	0,4	0,8
Nuclear	0,4	0,6	0,8	0,4	0,8	0,8	0,6
Geotermia	0,8	0,6	0,2	0,2	0,6	0,6	0,2
Biometano	1	0,6	0,2	0,6	0,8	0,2	1
Armazenamento de energia	1	0,8	0,6	1	0,8	0,6	0,2
Minerais críticos	0,8	0,6	0,4	0,6	0,6	0,8	0,4
Mobilidade elétrica	1	0,8	0,6	0,4	0,8	1	0,4
Biorrefino	0,4	1	1	1	0,4	0,8	0,4

Fonte: Petrobras (2025c)

Na sequência, a Tabela 17 apresenta a avaliação agregada dos decisores para Rentabilidade. Observa-se que CCUS, Armazenamento de energia e Mobilidade elétrica se destacaram de forma consistente em diversos critérios. Por outro lado, alternativas como eólica onshore e Biometano receberam avaliações mais modestas.

Tabela 17 – Avaliação Agregada dos Decisores para Rentabilidade

Alternativas/Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hidrogênio	0,800	0,800	0,533	0,733	0,533	0,467	0,733
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	0,867	0,667	0,667	0,667	0,467	0,733	0,800
Solar	0,600	0,600	0,600	0,800	0,467	0,600	0,667
Eólica onshore	0,400	0,333	0,333	0,600	0,333	0,600	0,600
Eólica offshore	0,667	0,533	0,733	0,733	0,733	0,600	0,667
Nuclear	0,733	0,667	0,400	0,533	0,733	0,667	0,533
Geotermia	0,667	0,667	0,467	0,333	0,600	0,600	0,333
Biometano	0,600	0,333	0,467	0,600	0,733	0,467	0,533
Armazenamento de energia	0,933	0,867	0,600	0,533	0,533	0,667	0,600
Minerais críticos	0,733	0,867	0,467	0,333	0,533	0,667	0,467
Mobilidade elétrica	0,867	0,600	0,733	0,667	0,467	0,733	0,467
Biorrefino	0,400	0,667	0,600	0,867	0,400	0,600	0,333
Pesos	0,214	0,103	0,140	0,085	0,159	0,196	0,103

Fonte: Petrobras (2025c)

O ranking consolidado das alternativas na dimensão Rentabilidade, disposto na Tabela 18, evidencia a primeira posição por pequena margem do CCUS, com pontuação de 0,705, seguido por Armazenamento de energia (0,696) e Mobilidade elétrica (0,673). O Hidrogênio aparece na quinta posição (0,643), e a Nuclear na sexta (0,629). Já Biorrefino (0,527) e Eólica onshore (0,450) ocuparam as últimas colocações, sinalizando menor destaque econômico no contexto analisado.

Tabela 18 – Ranking das Alternativas para Rentabilidade

Alternativas	Pontuação	Ranking
Hidrogênio	0,643	5
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	0,705	1
Solar	0,603	8
Eólica onshore	0,450	12
Eólica offshore	0,665	4
Nuclear	0,629	6
Geotermia	0,552	9
Biometano	0,542	10
Armazenamento de energia	0,696	2
Minerais críticos	0,604	7
Mobilidade elétrica	0,673	3
Biorrefino	0,527	11

Fonte: Petrobras (2025c)

Em sequência ao processo decisório, no segundo momento, é realizada a mesma estrutura de avaliação para o êxito Atratividade, iniciando pela avaliação dos critérios em determinado eixo, conforme exposto nas Tabelas 19, 20 e 21.

Tabela 19 – Avaliação dos Critérios de Atratividade - Decisor A

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Pontuação	Normalização	Pesos Individuais
C1	0	2	-1	3	0	0	1	5	0,639	0,183
C2	-2	0	-3	1	-2	-2	-1	-9	0,250	0,071
C3	1	3	0	3	1	1	2	11	0,806	0,230
C4	-3	-1	-3	0	-3	-3	-2	-15	0,083	0,024
C5	0	2	-1	3	0	0	1	5	0,639	0,183
C6	0	2	-1	3	0	0	1	5	0,639	0,183
C7	-1	1	-2	2	-1	-1	0	-2	0,444	0,127

Fonte: Petrobras (2025c)

Tabela 20 – Avaliação dos Critérios de Atratividade - Decisor A

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Pontuação	Normalização	Pesos Individuais
C1	0	0	-1	1	0	0	1	1	0,528	0,151
C2	0	0	-1	1	0	0	1	1	0,528	0,151
C3	1	1	0	2	1	1	2	8	0,722	0,206
C4	-1	-1	-2	0	-1	-1	0	-6	0,333	0,095
C5	0	0	-1	1	0	0	1	1	0,528	0,151
C6	0	0	-1	1	0	0	1	1	0,528	0,151
C7	-1	-1	-2	0	-1	-1	0	-6	0,333	0,095

Fonte: Petrobras (2025c)

Tabela 21 – Avaliação dos Critérios de Atratividade - Decisor A

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Pontuação	Normalização	Pesos Individuais
C1	0	2	1	1	0	0	1	5	0,639	0,183
C2	-2	0	-1	-1	-2	-2	-1	-9	0,250	0,071
C3	-1	1	0	0	-1	-1	0	-2	0,444	0,127
C4	-1	1	0	0	-1	-1	0	-2	0,444	0,127
C5	0	2	1	1	0	0	1	5	0,639	0,183
C6	0	2	1	1	0	0	1	5	0,639	0,183
C7	-1	1	0	0	-1	-1	0	-2	0,444	0,127

Fonte: Petrobras (2025c)

Em relação à Atratividade, os pesos consolidados dos critérios são apresentados na Tabela 22. A análise conjunta demonstrou maior relevância para a Sinergia de recursos O&G (C3), com peso de 0,188, seguida de Conteúdo legal e regulatório (C1), Disponibilidade de mão de obra capacitada (C5) e Cadeia de suprimento estabelecida (C6), todos com 0,172. Os demais critérios apresentaram valores menores, como Potenciais parcerias estratégicas (C4), com peso de 0,082, reforçando que os decisores priorizam variáveis institucionais e de integração setorial.

Tabela 22 – Pesos nos critérios de Atratividade

	Decisor A	Decisor B	Decisor C	Peso Final
C1	0,183	0,151	0,183	0,172
C2	0,071	0,151	0,071	0,098
C3	0,230	0,206	0,127	0,188
C4	0,024	0,095	0,127	0,082
C5	0,183	0,151	0,183	0,172
C6	0,183	0,151	0,183	0,172
C7	0,127	0,095	0,127	0,116

Fonte: Petrobras (2025c)

Dando sequência ao processo, se procede a avaliação das alternativas pelos três decisores no que tange seus respectivos desempenhos nos critérios de Atratividade, conforme apresentado nas Tabelas 23, 24 e 25.

Tabela 23 – Atribuição da Pontuação das Alternativas nos Critérios da Atratividade - Decisor A

Alternativas/Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hidrogênio	3	4	4	2	5	4	5
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	1	5	3	2	2	1	3
Solar	2	5	3	4	5	5	4
Eólica onshore	5	2	3	3	2	5	5
Eólica offshore	3	4	1	3	4	1	3
Nuclear	3	5	2	5	1	5	5
Geotermia	3	3	5	3	4	4	4
Biometano	4	5	2	3	5	2	3
Armazenamento de energia	3	1	1	5	4	5	2
Minerais críticos	4	5	5	1	1	5	1
Mobilidade elétrica	2	2	4	2	4	2	5
Biorrefino	2	1	2	5	5	1	1

Fonte: Petrobras (2025c)

Tabela 24 – Atribuição da Pontuação das Alternativas nos Critérios da Atratividade - Decisor B

Alternativas/Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hidrogênio	4	3	2	1	3	1	5
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	3	4	1	5	2	3	2
Solar	5	2	4	3	2	1	1
Eólica onshore	4	3	4	4	1	2	2
Eólica offshore	1	1	3	2	2	5	1
Nuclear	4	1	1	1	2	3	3
Geotermia	4	2	1	1	3	2	2
Biometano	5	2	1	2	1	4	1
Armazenamento de energia	2	3	2	5	4	1	2
Minerais críticos	2	1	5	3	1	5	3
Mobilidade elétrica	4	2	2	3	2	2	4
Biorrefino	3	1	5	3	4	5	1

Fonte: Petrobras (2025c)

Tabela 25 – Atribuição da Pontuação das Alternativas nos Critérios da Atratividade - Decisor C

Alternativas/Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hidrogênio	4	1	3	2	5	2	3
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	5	5	3	5	5	4	4
Solar	3	2	4	5	4	2	1
Eólica onshore	4	4	4	2	5	1	2
Eólica offshore	2	2	1	4	5	5	1
Nuclear	3	1	2	1	2	2	2
Geotermia	1	3	3	5	1	5	3
Biometano	4	3	4	1	5	3	2
Armazenamento de energia	1	2	5	4	2	1	5
Minerais críticos	5	5	3	2	2	3	5
Mobilidade elétrica	3	5	2	1	4	2	2
Biorrefino	1	4	5	4	4	5	4

Fonte: Petrobras (2025c)

Na sequência, as Tabelas 26, 27 e 28, apresentam os desempenhos normalizados das alternativas.

Tabela 26 – Normalização da Pontuação das Alternativas nos Critérios da Atratividade - Decisor A

Alternativas/Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hidrogênio	0,6	0,8	0,8	0,4	1	0,8	1
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	0,2	1	0,6	0,4	0,4	0,2	0,6
Solar	0,4	1	0,6	0,8	1	1	0,8
Eólica onshore	1	0,4	0,6	0,6	0,4	1	1
Eólica offshore	0,6	0,8	0,2	0,6	0,8	0,2	0,6
Nuclear	0,6	1	0,4	1	0,2	1	1
Geotermia	0,6	0,6	1	0,6	0,8	0,8	0,8
Biometano	0,8	1	0,4	0,6	1	0,4	0,6
Armazenamento de energia	0,6	0,2	0,2	1	0,8	1	0,4
Minerais críticos	0,8	1	1	0,2	0,2	1	0,2
Mobilidade elétrica	0,4	0,4	0,8	0,4	0,8	0,4	1
Biorrefino	0,4	0,2	0,4	1	1	0,2	0,2

Fonte: Petrobras (2025c)

Tabela 27 – Normalização da Pontuação das Alternativas nos Critérios da Atratividade - Decisor B

Alternativas/Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hidrogênio	0,8	0,6	0,4	0,2	0,6	0,2	1
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	0,6	0,8	0,2	1	0,4	0,6	0,4
Solar	1	0,4	0,8	0,6	0,4	0,2	0,2
Eólica onshore	0,8	0,6	0,8	0,8	0,2	0,4	0,4
Eólica offshore	0,2	0,2	0,6	0,4	0,4	1	0,2
Nuclear	0,8	0,2	0,2	0,2	0,4	0,6	0,6
Geotermia	0,8	0,4	0,2	0,2	0,6	0,4	0,4
Biometano	1	0,4	0,2	0,4	0,2	0,8	0,2
Armazenamento de energia	0,4	0,6	0,4	1	0,8	0,2	0,4
Minerais críticos	0,4	0,2	1	0,6	0,2	1	0,6
Mobilidade elétrica	0,8	0,4	0,4	0,6	0,4	0,4	0,8
Biorrefino	0,6	0,2	1	0,6	0,8	1	0,2

Fonte: Petrobras (2025c)

Tabela 28 – Normalização da Pontuação das Alternativas nos Critérios da Atratividade - Decisor C

Alternativas/Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hidrogênio	0,8	0,2	0,6	0,4	1	0,4	0,6
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	1	1	0,6	1	1	0,8	0,8
Solar	0,6	0,4	0,8	1	0,8	0,4	0,2
Eólica onshore	0,8	0,8	0,8	0,4	1	0,2	0,4
Eólica offshore	0,4	0,4	0,2	0,8	1	1	0,2
Nuclear	0,6	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4
Geotermia	0,2	0,6	0,6	1	0,2	1	0,6
Biometano	0,8	0,6	0,8	0,2	1	0,6	0,4
Armazenamento de energia	0,2	0,4	1	0,8	0,4	0,2	1
Minerais críticos	1	1	0,6	0,4	0,4	0,6	1
Mobilidade elétrica	0,6	1	0,4	0,2	0,8	0,4	0,4
Biorrefino	0,2	0,8	1	0,8	0,8	1	0,8

Fonte: Petrobras (2025c)

Na sequência, a Tabela 29 mostra a avaliação agregada dos decisores para Atratividade, na qual se destacaram Minerais críticos, Hidrogênio e Solar, que apresentaram consistência em critérios centrais, sobretudo naqueles de maior peso, e, alternativas como Nuclear e Eólica offshore obtiveram valores mais baixos.

Tabela 29 – Avaliação Agregada dos Decisores para Atratividade

Alternativas/Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hidrogênio	0,733	0,533	0,600	0,333	0,867	0,467	0,867
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	0,600	0,933	0,467	0,800	0,600	0,533	0,600
Solar	0,667	0,600	0,733	0,800	0,733	0,533	0,400
Eólica onshore	0,867	0,600	0,733	0,600	0,533	0,533	0,600
Eólica offshore	0,400	0,467	0,333	0,600	0,733	0,733	0,333
Nuclear	0,667	0,467	0,333	0,467	0,333	0,667	0,667
Geotermia	0,533	0,533	0,600	0,600	0,533	0,733	0,600
Biometano	0,867	0,667	0,467	0,400	0,733	0,600	0,400
Armazenamento de energia	0,400	0,400	0,533	0,933	0,667	0,467	0,600
Minerais críticos	0,733	0,733	0,867	0,400	0,267	0,867	0,600
Mobilidade elétrica	0,600	0,600	0,533	0,400	0,667	0,400	0,733
Biorrefino	0,400	0,400	0,800	0,800	0,867	0,733	0,400
Pesos	0,172	0,098	0,188	0,082	0,172	0,172	0,116

Fonte: Petrobras (2025c)

Por fim, o ranking consolidado gerado pelo WASPAS na Atratividade, apresentado na Tabela 30, evidenciou a liderança apertada dos Minerais críticos, com pontuação de 0,658, seguido por Hidrogênio (0,649) e Eólica onshore (0,648). A Solar alcançou a quinta posição, com 0,641, e o Biorrefino ocupou a quarta colocação, com 0,646. Já a Nuclear (0,511) e a Eólica offshore (0,517) se mantiveram nas últimas posições, refletindo menor Atratividade na avaliação conjunta dos decisores.

Tabela 30 – Ranking das Alternativas para Atratividade

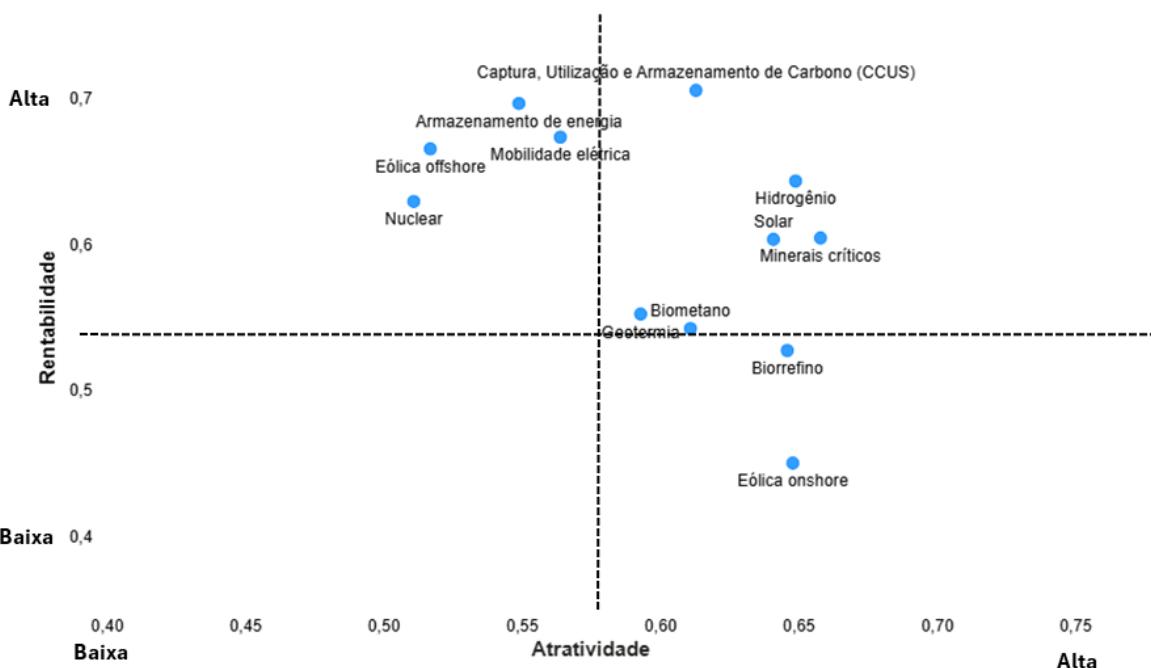
Alternativas	Pontuação	Ranking
Hidrogênio	0,649	2
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	0,613	6
Solar	0,641	5
Eólica onshore	0,648	3
Eólica offshore	0,517	11
Nuclear	0,511	12
Geotermia	0,593	8
Biometano	0,611	7
Armazenamento de energia	0,549	10
Minerais críticos	0,658	1
Mobilidade elétrica	0,564	9
Biorrefino	0,646	4

Fonte: Petrobras (2025c)

A Figura 4 representa a consolidação dos resultados obtidos a partir das avaliações dos três decisores considerados no estudo, sintetizando os valores de

Rentabilidade e Atratividade após a agregação das preferências. Observa-se que CCUS, Hidrogênio, Solar e Minerais críticos se destacaram no quadrante de alta Rentabilidade com Atratividade alta. Já tecnologias como Armazenamento de energia e Mobilidade elétrica se destacaram com menor Atratividade no grupo decisor, ainda que com Rentabilidade alta. No quadrante inferior, alternativas como Eólica onshore e Biorrefino foram priorizadas como de alta Rentabilidade, mas com baixa Atratividade. Por fim, Geotermia e Biometano ocupam posições intermediárias, refletindo equilíbrio moderado entre os dois eixos.

Figura 4 – Bolômetro da Rentabilidade e da Atratividade na Decisão em Grupo



Fonte: Petrobras (2025c)

A etapa complementar da modelagem foi o Tamanho de Mercado, permitindo relacionar as estimativas econômicas às análises de Rentabilidade e Atratividade já realizadas. Para isso, foram utilizadas estimativas de mercado em bilhões de dólares, baseadas na Despesa de Capital (CAPEX) dos planejamentos da Petrobras (Petrobras, 2024a; 2025a), considerando os intervalos de 2024-2028, 2025-2028 e 2050. Embora os dados de longo prazo, como 2050, apresentem grandes incertezas e sejam projeções, o propósito é demonstrar que a variável de Tamanho de Mercado pode fornecer uma base quantitativa essencial para relacionar as análises econômicas de Rentabilidade e Atratividade. A inclusão dessa variável na análise multicritério permite uma avaliação estratégica mais completa e alinhada aos

objetivos de diversificação da companhia. Destaca-se que alguns valores foram aproximados, de acordo com as projeções dos documentos, de forma a representar o mais fielmente possível a realidade do mercado. Dessa forma, o objetivo é demonstrar a viabilidade da metodologia proposta, ao adicionar a variável de Tamanho de Mercado.

As Tabelas 31, 32 e 33 apresentam estimativas fictícias, do Tamanho de Mercado (em bilhões de dólares) para os horizontes de 2024–2028, 2025–2029 e 2050 (ponto de referência), respetivamente, tomando como base diretrizes e planos setoriais. Observa-se maior robustez de mercado para Solar e Eólica onshore ao longo dos intervalos analisados, com Biorrefino também se destacando por trajetória consistente. Eólica offshore apresenta expansão relevante em 2025–2029, enquanto Nuclear, Geotermia e Minerais críticos mantêm valores mais modestos. Já Hidrogênio, CCUS, Mobilidade elétrica e Armazenamento de energia denotam mercados em fase de consolidação, com progressões graduais.

Tabela 31 – Estimativas do Tamanho de Mercado em Bilhões de Dólares (2024-2028)

Alternativas	Est. 1	Est. 2	Est. 3	Est. 4	Est. 5
Hidrogênio	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
CCUS	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Solar	2,6	3,0	3,2	3,5	3,8
Eólica onshore	2,6	2,8	3,0	3,2	3,5
Eólica offshore	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Nuclear	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Geotermia	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Biometano	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Armazenamento de energia	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Minerais críticos	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Mobilidade elétrica	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Biorrefino	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5

Fonte: Adaptado de (Petrobras, 2024a; b, 2025a; b)

Tabela 32 – Estimativas do Tamanho de Mercado em Bilhões de Dólares (2025-2029)

Alternativas	Est. 1	Est. 2	Est. 3	Est. 4	Est. 5
Hidrogênio	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
CCUS	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Solar	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9
Eólica onshore	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
Eólica offshore	0,9	1,0	1,2	1,3	1,5
Nuclear	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Geotermia	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Biometano	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Armazenamento de energia	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Minerais críticos	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Mobilidade elétrica	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Biorrefinaria	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3

Fonte: Adaptado de (Petrobras, 2024a; b, 2025a; b)

Tabela 33 – Estimativas do Tamanho de Mercado em Bilhões de Dólares (2050)

Alternativas	Est. 1	Est. 2	Est. 3	Est. 4	Est. 5
Hidrogênio	1,5	1,8	2,0	2,3	2,5
CCUS	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Solar	4,0	4,3	4,6	4,8	5,0
Eólica onshore	4,5	4,8	5,0	5,3	5,5
Eólica offshore	2,0	2,3	2,5	2,7	3,0
Nuclear	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Geotermia	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Biometano	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7
Armazenamento de energia	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Minerais críticos	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Mobilidade elétrica	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Biorrefinaria	3,0	3,3	3,5	3,8	4,0

Fonte: Adaptado de (Petrobras, 2024a; b, 2025a; b)

As Tabelas 34, 35 e 36 mostram as medidas descritivas e incerteza associada às estimativas: média, desvio-padrão, erro-padrão, graus de liberdade ($gl = n - 1$) e margem do valor crítico, compondo intervalos de confiança de referência. Em linhas gerais, tecnologias com maiores mercados médios (Solar e Eólica onshore) exibem margens compatíveis com sua variabilidade, enquanto domínios como Nuclear, Geotermia e Minerais críticos apresentam dispersões menores, condizentes com escalas de mercado mais contidas. Eólica offshore e as demais tendem a registrar maior amplitude relativa, refletindo cenários de crescimento e maior incerteza prospectiva.

Tabela 34 – Estatísticas Descritivas do Tamanho de Mercado (2024-2028)

Alternativas	Média	Desvio-padrão	Erro Padrão	(gl=n-1)	Margem
Hidrogênio	0,3	0,16	0,07	2,78	0,20
CCUS	0,4	0,16	0,07	2,78	0,20
Solar	3,2	0,46	0,21	2,78	0,57
Eólica onshore	3,0	0,35	0,16	2,78	0,43
Eólica offshore	0,3	0,16	0,07	2,78	0,20
Nuclear	0,1	0,02	0,01	2,78	0,02
Geotermia	0,1	0,02	0,01	2,78	0,02
Biometano	0,3	0,16	0,07	2,78	0,20
Armazenamento de energia	0,3	0,16	0,07	2,78	0,20
Minerais críticos	0,1	0,02	0,01	2,78	0,02
Mobilidade elétrica	0,3	0,16	0,07	2,78	0,20
Biorrefino	2,0	0,38	0,17	2,78	0,47

Fonte: Petrobras (2025c)

Tabela 35 – Estatísticas Descritivas do Tamanho de Mercado (2025-2029)

Alternativas	Média	Desvio-padrão	Erro Padrão	(gl=n-1)	Margem
Hidrogênio	0,7	0,16	0,07	2,78	0,20
CCUS	0,6	0,16	0,07	2,78	0,20
Solar	2,5	0,32	0,14	2,78	0,39
Eólica onshore	2,6	0,32	0,14	2,78	0,39
Eólica offshore	1,2	0,24	0,11	2,78	0,30
Nuclear	0,2	0,04	0,02	2,78	0,05
Geotermia	0,2	0,04	0,02	2,78	0,05
Biometano	0,8	0,16	0,07	2,78	0,20
Armazenamento de energia	0,4	0,16	0,07	2,78	0,20
Minerais críticos	0,2	0,04	0,02	2,78	0,05
Mobilidade elétrica	0,4	0,16	0,07	2,78	0,20
Biorrefino	1,9	0,32	0,14	2,78	0,39

Fonte: Petrobras (2025c)

Tabela 36 – Estatísticas Descritivas do Tamanho de Mercado (2050)

Alternativas	Média	Desvio-padrão	Erro Padrão	(gl=n-1)	Margem
Hidrogênio	2,0	0,40	0,18	2,78	0,49
CCUS	1,6	0,32	0,14	2,78	0,39
Solar	4,5	0,40	0,18	2,78	0,49
Eólica onshore	5,0	0,40	0,18	2,78	0,49
Eólica offshore	2,5	0,38	0,17	2,78	0,47
Nuclear	0,7	0,16	0,07	2,78	0,20
Geotermia	0,6	0,16	0,07	2,78	0,20
Biometano	1,3	0,27	0,12	2,78	0,34
Armazenamento de energia	1,2	0,32	0,14	2,78	0,39
Minerais críticos	0,7	0,16	0,07	2,78	0,20
Mobilidade elétrica	1,2	0,32	0,14	2,78	0,39
Biorrefino	3,5	0,40	0,18	2,78	0,49

Fonte: Petrobras (2025c)

Por sua vez, a Tabela 37 consolida, para cada alternativa, as pontuações finais de Rentabilidade e Atratividade e as médias do Tamanho de Mercado nos três horizontes reportados (2024–2028; 2025–2029; 2050). Essa visão integrada permite identificar quadrantes de interesse e qualifica o porte econômico relativo do mercado associado. Por exemplo, eólica onshore combina Atratividade elevada com mercados médios superiores e trajetória ascendente; CCUS e Armazenamento de energia preservam destaque em Rentabilidade, com mercados em expansão gradual; e Solar mantém desempenho competitivo com massa de mercado robusta. Por sua vez, domínios como Geotermia e Nuclear mostram consistência moderada em desempenho, associada a escalas de mercado menores.

Tabela 37 – Integração de Rentabilidade, Atratividade e Tamanho de Mercado

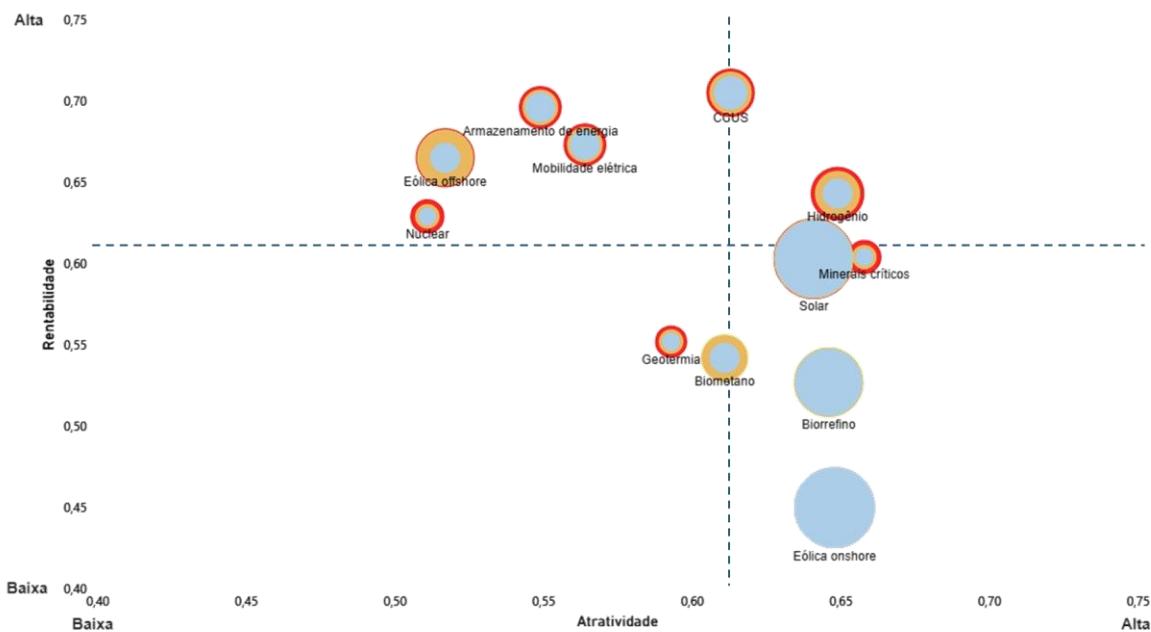
Alternativas	Rentabilidade	Atratividade	(2024–2028)	(2025–2029)	2050
Hidrogênio	0,643	0,649	0,30	0,70	2,02
CCUS	0,705	0,613	0,40	0,60	1,60
Solar	0,603	0,641	3,22	2,50	4,54
Eólica onshore	0,45	0,648	3,02	2,60	5,02
Eólica offshore	0,665	0,517	0,30	1,18	2,50
Nuclear	0,629	0,511	0,07	0,15	0,70
Geotermia	0,552	0,593	0,07	0,15	0,60
Biometano	0,542	0,611	0,30	0,80	1,34
Armazenamento de energia	0,696	0,549	0,30	0,40	1,20
Minerais críticos	0,604	0,658	0,07	0,15	0,70
Mobilidade elétrica	0,673	0,564	0,30	0,40	1,20
Biorrefino	0,527	0,646	2,00	1,90	3,52

Fonte: Petrobras (2025c)

Finalizando a modelagem, as médias do Tamanho de Mercado de cada alternativa foram incorporadas ao bolômetro de decisão da Figura 5, ampliado para representar não apenas os eixos de Rentabilidade e Atratividade, mas também a dimensão econômica: o diâmetro das circunferências foi ajustado proporcionalmente às médias estimadas. Para facilitar a leitura temporal, adotou-se a seguinte codificação cromática: vermelho para 2050, amarelo-claro para 2025–2029 e azul para 2024–2028.

Percebe-se que tecnologias como Solar, Eólica onshore e Biorrefino aparecem graficamente em destaque, com círculos de maior dimensão, sinalizando oportunidades econômicas mais consistentes. Em contrapartida, alternativas como Geotermia, Armazenamento de energia e Mobilidade elétrica são representadas por círculos menores, refletindo mercados ainda incipientes.

Figura 5 – Bolômetro da Rentabilidade, da Atratividade e do Tamanho de Mercado



Fonte: Petrobras (2025c)

Referências

BANDEIRAS, F. et al. Multi-criteria sustainability assessment of energy resources in the energy supply chain of smart city ecosystems. **Energy Nexus**, v. 18, n. April, p. 100441, 2025.

DTEN. Revisão de metodologia multicritério para seleção e priorização de segmentos em Transição Energética. 2024.

GOMES, C. F. S. et al. Sapevo-m: A group multicriteria ordinal ranking method. **Pesquisa Operacional**, v. 40, p. 1–23, 2020.

GOMES, L. F. A. M.; MURY, A. R.; GOMES, C. F. S. Multicriteria ranking with ordinal data. **Systems Analysis Modelling Simulation**, v. 27, n. 2–3, p. 139–145, 1997.

KABEYI, M. J. B.; OLANREWAJU, O. A. Sustainable Energy Transition for Renewable and Low Carbon Grid Electricity Generation and Supply. **Frontiers in Energy Research**, v. 9, n. March, p. 1–45, 2022.

PETROBRAS. Plano Estratégico da Petrobras. p. 167–186, 2024a.

_____. Petrobras - Strategic Plan 2050 and Business Plan 2025-2029. v. 2050, n. Sp 2050, 2024b.

_____. Plano de Negócios PETROBRAS 2025-2029. p. 12–96, 2025a.

_____. Petrobras approves Strategic Plan 2024-2028+. v. 2025, n. i, 2025b.

_____. Relatório de Informações Sobre a Modelagem Multicritério e Análise de Variáveis das Energias Renováveis Pela Petrobras. 2025c.

SAHOO, S. K. A Comprehensive Review of Multi-criteria Decision-making (MCDM) Toward Sustainable Renewable Energy Development. **Spectrum of Operational Research**, v. 2, n. 1, p. 268–284, 2025.

SANTOS, M. DOS et al. Ferramentas computacionais de apoio à tomada de decisão. **São Paulo, Brasil**, 2023.

WEI, Y. M. A Hybrid Multi-Criteria Decision-Making Framework for the Strategic Evaluation of Business Development Models. **Information (Switzerland)**, v. 16, n. 6, 2025.

ZAVADSKAS, E. K. et al. Optimization of weighted aggregated sum product assessment. **Elektronika ir Elektrotechnika**, v. 122, n. 6, p. 3–6, 2012.

Tabelas da Escala *Likert* para os Critérios

Critérios de Rentabilidade

Baixa concorrência (Tabela A1): Refere-se ao nível de competição no mercado da alternativa energética, considerando barreiras de entrada, concentração de players e atratividade do setor.

Tabela A1 – Baixa concorrência

Escala	Significado
1	Mercado saturado, concorrência intensa e margens comprimidas.
2	Elevada concorrência, ainda com barreiras reduzidas.
3	Concorrência moderada, espaço limitado para novos entrantes.
4	Baixa concorrência em segmentos estratégicos e em crescimento.
5	Concorrência mínima, mercado altamente atrativo.

Fonte: Petrobras (2025c)

Demanda de mercado (Tabela A2): Considera a perspectiva de consumo futuro, incluindo tendências de eletrificação, descarbonização e políticas públicas de incentivo.

Tabela A2 – Demanda de Mercado

Escala	Significado
1	Demanda muito baixa, sem perspectiva de crescimento.
2	Baixa demanda, crescimento restrito.
3	Demanda estável, crescimento moderado.
4	Alta demanda, com políticas e regulação favoráveis.
5	Demanda muito elevada, com projeções robustas e sustentadas.

Fonte: Petrobras (2025c)

Baixo risco associado (Tabela A3): Abrange riscos tecnológicos, regulatórios, financeiros e ambientais.

Tabela A3 – Baixo risco associado

Escala	Significado
1	Altíssimo risco, inviabilidade provável.
2	Risco elevado, grande incerteza.
3	Risco moderado, parcialmente controlável.
4	Risco baixo, condições favoráveis.
5	Risco mínimo, tecnologia consolidada e ambiente regulatório estável.

Fonte: Petrobras (2025c)

Conhecimento de mercado (Tabela A4): Grau de familiaridade da empresa com o setor, considerando experiência prévia, know-how acumulado e inteligência competitiva.

Tabela A4 – Conhecimento de mercado

Escala	Significado
1	Ausência de conhecimento e experiência.
2	Conhecimento restrito e superficial.
3	Conhecimento intermediário, mas com lacunas.
4	Conhecimento sólido e bem estruturado.
5	Amplo domínio do setor e expertise consolidada.

Fonte: Petrobras (2025c)

Margem de Lucro associado (Tabela A5): Relaciona a rentabilidade líquida esperada, considerando custos, escala e competitividade.

Tabela A5 – Margem de Lucro

Escala	Significado
1	Margem negativa ou nula.
2	Margem muito baixa.
3	Margem moderada.
4	Margem atrativa, retorno consistente.
5	Margem muito elevada e sustentável.

Fonte: Petrobras (2025c)

Barreiras de entrada (Tabela A6): Refere-se à dificuldade de novos concorrentes acessarem o mercado, seja por capital, tecnologia ou regulação.

Tabela A6 – Barreiras de entrada

Escala	Significado
1	Barreiras inexistentes, entrada livre.
2	Barreiras baixas, fácil entrada.
3	Barreiras moderadas, entrada restrita.
4	Barreiras elevadas, exigindo capital/tecnologia.
5	Barreiras muito altas, mercado protegido.

Fonte: Petrobras (2025c)

Baixa necessidade de investimento / incentivos governamentais (Tabela A7): Analisa o montante de capital necessário e a dependência de políticas públicas para viabilizar a alternativa.

Tabela A7 – Baixa necessidade de investimento / incentivos governamentais

Escala	Significado
1	Investimento muito alto e dependente de subsídios.
2	Investimento alto, fortemente dependente de incentivos.
3	Investimento moderado, com dependência parcial.
4	Investimento acessível e sustentável.
5	Baixo investimento, mínima dependência governamental.

Fonte: Petrobras (2025c)

Critérios de Atratividade

Conteúdo legal e regulatório associado (Tabela A8): Verifica o alinhamento da alternativa com o marco legal vigente e estabilidade regulatória aplicável.

Tabela A8 – Conteúdo legal e regulatório

Escala	Significado
1	Forte insegurança regulatória.
2	Regulamentação desfavorável.
3	Regras parcialmente favoráveis.
4	Regulamentação estável e favorável.
5	Amplo suporte legal e políticas sólidas.

Fonte: Petrobras (2025c)

Maturidade tecnológica (Tabela A9): Nível de desenvolvimento e difusão das tecnologias renováveis (solar, eólica, biocombustíveis, hidrogênio, CCUS).

Tabela A9 – Maturidade tecnológica

Escala	Significado
1	Experimental/laboratorial.
2	Projetos pilotos restritos.
3	Tecnologia em difusão inicial, uso crescente.
4	Consolidação no mercado.
5	Tecnologia madura e amplamente difundida.

Fonte: Petrobras (2025c)

Sinergia de recursos O&G (Tabela A10): Grau de integração da alternativa com a infraestrutura e expertise existentes no setor de óleo e gás.

Tabela A10 – Sinergia de recursos O&G

Escala	Significado
1	Nenhuma sinergia identificada.
2	Sinergia limitada, pouca integração.
3	Integração parcial.
4	Boa integração com processos existentes.
5	Alta sinergia estratégica.

Fonte: Petrobras (2025c)

Potenciais parcerias estratégicas (Tabela A11): Identifica a possibilidade de estabelecer alianças estratégicas para viabilizar e expandir a alternativa.

Tabela A11 – Potenciais parcerias estratégicas

Escala	Significado
1	Nenhuma parceria viável.
2	Poucas parcerias possíveis.
3	Algumas parcerias relevantes.
4	Amplo potencial de parcerias.
5	Fortes parcerias estratégicas já consolidadas.

Fonte: Petrobras (2025c)

Disponibilidade de mão de obra capacitada (Tabela A12): Avalia a existência de profissionais qualificados para atuar na alternativa energética.

Tabela A12 – Disponibilidade de mão de obra

Escala	Significado
1	Mão de obra praticamente inexistente.
2	Mão de obra escassa e pouco qualificada.
3	Disponibilidade moderada, com necessidade de capacitação.
4	Boa disponibilidade de profissionais.
5	Ampla disponibilidade de mão de obra especializada.

Fonte: Petrobras (2025c)

Cadeia de suprimento estabelecida (Tabela A13): Examina a existência de fornecedores, insumos e infraestrutura logística para a alternativa.

Tabela A13 – Cadeia de suprimento estabelecida

Escala	Significado
1	Cadeia inexistente ou desestruturada.
2	Cadeia incipiente e pouco confiável.
3	Cadeia parcialmente estruturada.
4	Cadeia consolidada e eficiente.
5	Cadeia robusta, integrada e globalmente competitiva.

Fonte: Petrobras (2025c)

Benefício socioambiental e alinhamento à economia de baixo carbono (Tabela A14): Analisa os impactos positivos em termos de sustentabilidade, descarbonização e inclusão social.

Tabela A14 – Benefício socioambiental e alinhamento à economia de baixo carbono

Escala	Significado
1	Impactos negativos ao meio ambiente e sociedade.
2	Poucos benefícios socioambientais.
3	Benefícios moderados, parcialmente alinhados à transição energética.
4	Fortes benefícios ambientais e sociais.
5	Total alinhamento com a economia de baixo carbono.

Fonte: Petrobras (2025c)