

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MATEUS VERANI GONÇALVES

**ACORDO DE PARIS, MERCADOS DE CRÉDITO DE CARBONO E
AVALIAÇÃO DE PROJETOS POR FONTES RENOVÁVEIS:
proposição de um modelo multicriterial de apoio à decisão**

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MATEUS VERANI GONÇALVES

**ACORDO DE PARIS, MERCADOS DE CRÉDITO DE CARBONO E
AVALIAÇÃO DE PROJETOS POR FONTES RENOVÁVEIS:
proposição de um modelo multicriterial de apoio à decisão**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.

Orientador:
Prof. Everthon Taghori Sica, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2026.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Gonçalves, Mateus Verani

ACORDO DE PARIS, MERCADOS DE CRÉDITO DE CARBONO E
AVALIAÇÃO DE PROJETOS POR FONTES RENOVÁVEIS: proposição de um
modelo multicriterial de apoio à decisão / Mateus
Verani Gonçalves; orientação de Everthon Taghori
Sica. - Florianópolis, SC, 2026.

138 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico
de Eletrotécnica.

Inclui Referências.

1. Acordo de Paris. 2. Mercado de Carbono. 3. Modelo
Multicriterial. 4. Apoio à Decisão. 5. Adicionalidade.
I. Sica, Everthon Taghori. II. Instituto Federal de
Santa Catarina. III. ACORDO DE PARIS, MERCADOS DE
CRÉDITO DE CARBONO E AVALIAÇÃO DE PROJETOS POR FONTES
RENOVÁVEIS.

ACORDO DE PARIS, MERCADOS DE CRÉDITO DE CARBONO E AVALIAÇÃO DE PROJETOS POR FONTES RENOVÁVEIS: proposição de um modelo multicriterial de apoio à decisão

MATEUS VERANI GONÇALVES

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 14 de julho, 2026

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **EVERTHON TAGHORI SICA**
Data: 14/07/2026 16:05:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Everthon Taghori Sica, Dr. Eng.

Documento assinado digitalmente
 **CASSIO AURELIO SUSKI**
Data: 14/07/2026 16:44:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Cássio Aurélio Suski, Dr. Eng.

Documento assinado digitalmente
 **SERGIO LUCIANO AVILA**
Data: 14/07/2026 18:25:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Sérgio Luciano Ávila, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família, que sempre foi minha base e minha maior rede de apoio ao longo de toda essa trajetória.

À minha mãe, pelo amor incondicional, pelo incentivo diário, por todas as orações e por sempre me incentivar a seguir em frente.

Ao meu pai, por ser meu alicerce e por nunca medir esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

À minha irmã, pela parceria e por ser meu braço direito. Obrigado por todo apoio e por ser alguém com quem sempre posso contar.

À minha noiva, Carolina, minha companheira que caminhou ao meu lado por toda a trajetória. Obrigado pelo amor, pelo apoio e pela paciência que tornaram os momentos difíceis mais leves.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, pelo aprendizado e pela amizade ao longo desses anos.

Um agradecimento especial ao meu orientador Sica, uma das pessoas mais brilhantes que tive o privilégio de conhecer durante minha formação. Agradeço pela paciência, pela disponibilidade e pelas valiosas orientações ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sou profundamente grato por todo o apoio recebido e me sinto honrado por ter sido seu orientando.

Agradeço ao professor Sérgio Luciano Ávila pelos ensinamentos compartilhados durante a graduação e por aceitar o convite para compor a banca examinadora deste trabalho. Sua participação representa uma grande satisfação para mim.

Ao professor Cássio Aurélio Suski, agradeço por aceitar o convite para integrar a banca examinadora, dedicando seu tempo à leitura e à avaliação deste trabalho. Tenho certeza de que suas contribuições serão valiosas e enriquecedoras.

RESUMO

A crescente urgência em mitigar os efeitos das mudanças climáticas tem impulsionado a promoção dos mercados de carbono como instrumentos econômicos para incentivar a redução ou compensação de emissões de gases de efeito estufa. Diante desse cenário, este trabalho analisa sobre os impactos do Acordo de Paris no mercado de crédito de carbono e sua relevância para o setor elétrico brasileiro com o objetivo de desenvolver e aplicar um modelo multicriterial de apoio à decisão para a avaliação de projetos de crédito de carbono. Para tanto, inicialmente, é apresentada a evolução dos mecanismos internacionais de mitigação climática, com ênfase no Artigo 6 do Acordo de Paris e seus desdobramentos nos mercados regulado e voluntário de carbono, tanto no âmbito global quanto nacional. Em seguida, são apresentados os métodos de apoio à decisão, com destaque para o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e o MAUT (*Multiple Attribute Utility Theory*), baseado em indicadores associados à linha de base e à adicionalidade de projetos de carbono, estruturado a partir de diferentes Pontos de Vista Fundamentais (PVFs) e seus respectivos descritores. Por fim, o modelo é aplicado em um estudo de caso com cinco projetos de diferentes tecnologias de geração de energia e mitigação de emissões, permitindo a avaliação comparativa por meio dos critérios definidos, a agregação dos resultados e a análise de sensibilidade para verificação da robustez da avaliação.

Palavras-chave: Acordo de Paris. Mercado de carbono. Modelo multicriterial. Apoio à decisão. Adicionalidade.

ABSTRACT

The growing urgency to mitigate the effects of climate change has promoted the development of carbon markets as economic instruments to encourage the reduction or offsetting of greenhouse gas emissions. In this context, this study analyzes the impacts of the Paris Agreement on the carbon credit market and its relevance to the Brazilian electricity sector, with the objective of developing and applying a multicriteria decision support model for the evaluation of carbon credit projects. To this end, the evolution of international climate mitigation mechanisms is first presented, with emphasis on Article 6 of the Paris Agreement and its developments in both regulated and voluntary carbon markets at the global and national levels. Subsequently, decision support methods are presented, with emphasis on the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Multiple Attribute Utility Theory (MAUT), based on indicators associated with project baseline and additionality, structured according to different Fundamental Points of View (FPVs) and their respective descriptors. Finally, the model is applied to a case study involving five projects based on different energy generation and emissions mitigation technologies, enabling a comparative evaluation through the defined criteria, the aggregation of results, and a sensitivity analysis to verify the robustness of the evaluation.

Keywords: Paris Agreement. Carbon market. Multicriteria model. Decision support. Additionality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Status dos Mercados Regulados no Mundo.....	29
Figura 2 – Projetos Mercado Voluntário Brasileiro 2024	38
Figura 3 – Matriz de Concordância para Níveis de Impacto ou Critérios	44
Figura 4 – Matriz de Concordância	45
Figura 5 – Exemplo Cálculo Variáveis de Matriz de Concordância Ordem $n=3$	47
Figura 6 – Método AHP para Descritores ou PVFs	53
Figura 7 – Árvore de Pontos de Vista Fundamentais	58
Figura 8 – Resumo dos Descritores	59
Figura 9 – Indicadores do PVF Técnico	62
Figura 10 – Indicadores do PVF Linha de Base	67
Figura 11 – Indicadores do PVF Adicionalidade.....	72
Figura 12 – Indicadores do PVF Ambiental	77
Figura 13 – Indicadores do PVF Monitoramento, Relato, Verificação	81
Figura 14 – Indicadores do PVF Robustez Metodológica e Mercado de Carbono	85
Figura 15 – Indicadores do PVF Econômico	89
Figura 16 – <i>Trade-off</i> dos Pontos de Vista Fundamentais (PVFs)	96
Figura 17 – Trade-off dos descritores do PVF Técnico	97
Figura 18 – Trade-off dos descritores do PVF Linha de Base.....	98
Figura 19 – Trade-off dos descritores do PVF Adicionalidade	99
Figura 20 – Trade-off dos descritores do PVF Ambiental.....	99
Figura 21 – Trade-off do PVF Monitoramento, Relato, Verificação (MRV).....	100
Figura 22 – Trade-off do PVF Robustez Metodológica e Mercado de Carbono	101
Figura 23 – Trade-off do PVF Econômico	101
Figura 24 – Trade-off Global dos Indicadores	102
Figura 25 – Matriz de Consequência dos Indicadores	103
Figura 26 – Escala Ordinal dos Indicadores.....	104
Figura 27 – Matriz Intermediária do Cálculo dos K_s	105
Figura 28 – Matriz de Valor Econômico $v(.)$ dos Projetos	106
Figura 29 – Função de Valor $v(.)$ do Critério Qualitativo: Grau de Impacto na Transformação Energética do Cenário de Linha de Base (adm)	108
Figura 30 – Função de Valor $v(.)$ do Critério Qualitativo: Fonte Energética para Produção de Hidrogênio na Linha de Base do Projeto	108
Figura 31 – Função de Valor $v(.)$ do Critério Qualitativo: Aproveitamento do Biogás	108

Figura 32 – Função de Valor $v(.)$ do Critério Qualitativo: Aproveitamento dos Resíduos de Biomassa	109
Figura 33 – Função de Valor $v(.)$ do Critério Qualitativo: Potencial de Economia Circular.....	109
Figura 34 – Função de Valor $v(.)$ do Critério Qualitativo: Risco de Impacto sobre Ecossistemas e Biodiversidade.....	109
Figura 35 – Função de Valor $v(.)$ do Critério Qualitativo: Monitoramento e Verificação das Emissões	110
Figura 36 – Função de Valor $v(.)$ do Critério Qualitativo: Maturidade da Metodologia de Certificação.....	110
Figura 37 – Função de Valor $v(.)$ do Critério Qualitativo: Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário.....	110
Figura 38 – Comportamento das Curvas de Propensão, Aversão e Indiferença.....	111
Figura 39 – Curvas de Valor Econômico $v(.)$ dos Projetos sob o PVF Técnico.....	112
Figura 40 – Curvas de Valor Econômico $v(.)$ dos Projetos sob o PVF Linha de Base.....	113
Figura 41 – Curvas de Valor Econômico $v(.)$ dos Projetos sob o PVF Adicionalidade.....	114
Figura 42 – Curvas de Valor Econômico $v(.)$ dos Projetos sob o PVF Ambiental ...	115
Figura 43 – Curvas de Valor Econômico $v(.)$ dos Projetos sob o PVF Monitoramento, Verificação, Relato	116
Figura 44 – Curvas de Valor Econômico $V(.)$ dos Projetos sob o PVF Robustez Metodológica e Mercado de Carbono	117
Figura 45 – Curvas de Valor Econômico $v(.)$ dos Projetos sob o PVF Econômico.....	117
Figura 46 – Valor Global Agregação Aditiva dos Projetos.....	118
Figura 47 – Diferença Relativa para o Melhor Projeto.....	119
Figura 48 – Descritores com Alto Desempenho no Projeto D	119
Figura 49 – Critério de Maior Impacto entre a Segunda Melhor Alternativa e a Melhor Alternativa	121
Figura 50 – Novos Trade-offs para uma variação de 287%	122
Figura 51 – Novo Valor Econômico Global das Melhores Alternativas	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala Saaty	44
Tabela 2 – Índice de Consistência	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	14
1.2	Definição do Problema	21
1.3	Objetivo Geral.....	21
1.4	Objetivos Específicos	22
1.5	Estrutura do Trabalho.....	22
2	ACORDO DE PARIS E O PANORAMA DOS MERCADOS DE CARBONO REGULADO E VOLUNTÁRIO.....	23
2.1	Acordo de Paris.....	23
2.2	Mercado de Crédito de Carbono.....	26
2.2.1	Mercado Regulado no Mundo	27
2.2.2	Mercado Regulado no Brasil	30
2.2.3	Mercados Voluntários Internacionais	33
2.2.4	Mercado Voluntário no Brasil	36
2.3	Considerações	39
3	MÉTODOS DE APOIO À DECISÃO.....	41
3.1	Método AHP	42
3.1.1	Auto-Vetores	44
3.1.2	Máximo Autovalor	45
3.1.3	Coeficiente de Racionalidade.....	46
3.1.4	Função de Valor Econômico	47
3.2	Método MAUT (<i>Multiple Attribute Utility Theory</i>)	47
3.2.1	Matriz de Indiferença.....	48
3.2.2	Função de Valor Econômico	49
3.3	Método <i>Direct Rating</i>	50
3.4	Trade-off.....	51
3.4.1	AHP	52
3.4.2	Direct Rating	53
3.5	Agregação Aditiva.....	53
3.6	Considerações	54
4	MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO.....	55
4.1	Árvore de Decisão.....	56
4.2	Pontos de Vista Fundamentais (PVFs) e seus Descritores	57
4.2.1	Ponto de Vista Fundamental: Técnico	61
4.2.1.1	<i>Fator de Emissão de CO₂ por Calor Gerado.....</i>	<i>61</i>
4.2.1.2	<i>Fator de Emissão de CO₂ por Energia Elétrica Gerada</i>	<i>62</i>
4.2.1.3	<i>Fator de Emissão de CH₄ Proveniente de Combustão para Geração de Calor</i>	<i>63</i>
4.2.1.4	<i>Eficiência na Geração de Eletricidade</i>	<i>64</i>
4.2.1.5	<i>Percentual de Combustíveis Fósseis Co-queimados.....</i>	<i>65</i>
4.2.2	Ponto de Vista Fundamental: Linha de Base	65
4.2.2.1	<i>Grau de Impacto na Transformação Energética do Cenário de Linha de Base.....</i>	<i>66</i>
4.2.2.2	<i>Fonte Energética para Produção de Hidrogênio na Linha de Base do Projeto.....</i>	<i>67</i>
4.2.2.3	<i>Emissões da Linha de Base Estimadas no PDD.....</i>	<i>68</i>

4.2.2.4	<i>Emissões do Projeto Estimadas no PDD</i>	69
4.2.2.5	<i>Redução das Emissões Estimadas no PDD</i>	70
4.2.3	Ponto de Vista Fundamental: Adicionalidade	70
4.2.3.1	<i>Emissões do Projeto Verificadas</i>	71
4.2.3.2	<i>Emissões Indiretas por Vazamento (Leakage)</i>	72
4.2.3.3	<i>Redução Verificada nas Emissões</i>	73
4.2.3.4	<i>Índice de Redução das Emissões em Relação à Linha de Base</i>	74
4.2.3.5	<i>Índice de Emissões do Projeto em Relação à Linha de Base</i>	75
4.2.4	Ponto de Vista Fundamental: Ambiental	75
4.2.4.1	<i>Emissões de CO2 associadas ao Transporte</i>	76
4.2.4.2	<i>Aproveitamento do Biogás</i>	77
4.2.4.3	<i>Aproveitamento dos Resíduos de Biomassa</i>	77
4.2.4.4	<i>Potencial de Economia Circular</i>	78
4.2.4.5	<i>Risco de Impacto sobre Ecossistemas e Biodiversidade</i>	79
4.2.5	Ponto de Vista Fundamental: Monitoramento, Relato e Verificação	80
4.2.5.1	<i>Monitoramento e Verificação das Emissões</i>	80
4.2.5.2	<i>Índice das Emissões do Projeto Verificadas em relação às Emissões Estimadas no PDD</i>	81
4.2.5.3	<i>Índice de Redução das Emissões Verificadas em relação às Reduções Estimadas no PDD</i>	82
4.2.6	Ponto de Vista Fundamental: Robustez Metodológica e Mercado de Carbono	83
4.2.6.1	<i>Maturidade da Metodologia de Certificação</i>	84
4.2.6.2	<i>Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário</i>	85
4.2.7	Ponto de Vista Fundamental: Econômico	87
4.2.7.1	<i>Taxa de Retorno Econômico dos Créditos de Carbono</i>	88
4.2.7.2	<i>Taxa Interna de Retorno (TIR) do Projeto</i>	89
4.3	Considerações	89
5	ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	90
5.1	Projetos Avaliados	91
5.1.1	Projeto A: Planta de Biomassa para Cogeração de Calor e Energia Elétrica	91
5.1.2	Projeto B: Planta de Biogás de Aterro Sanitário	92
5.1.3	Projeto C: Planta Solar Fotovoltaica	92
5.1.4	Projeto D: Planta Eólicoelétrica	93
5.1.5	Projeto E: Planta de Hidrogênio por Eletrólise da Água	94
5.2	Trade-offs	94
5.2.1	<i>Trade-offs dos Pontos de Vista Fundamentais</i>	95
5.2.2	<i>Trade-offs dos descritores</i>	95
5.2.3	<i>Trade-off Global dos Descritores</i>	101
5.3	Matriz de Consequência	102
5.4	Matriz de Indiferença	103
5.5	Matriz de Valor Econômico	105
5.6	Agregação Aditiva	117
5.7	Análise de Sensibilidade	119
5.8	Considerações	123
6	CONCLUSÃO	124
6.1	Limitações	125

REFERÊNCIAS	126
-------------------	-----

1 INTRODUÇÃO

As emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) se intensificaram nas últimas décadas e são uma das principais causas das mudanças climáticas. Segundo relatório recente do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), a elevação das temperaturas médias globais e a maior frequência de eventos climáticos extremos são impactos diretamente relacionados ao aumento das emissões de GEE geradas pelas atividades produtivas e demandas energéticas da humanidade nas últimas décadas. O mesmo relatório do IPCC aponta também que a temperatura terrestre subiu cerca de 1,1°C desde 1850, reforçando a necessidade de reduzir as emissões ao redor do globo.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2025) as emissões de carbono relacionadas ao uso de energia no mundo atingiram a maior marca histórica em 2024, com 37,8 bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e). O Brasil, por sua vez, configura-se como o 6º maior emissor de GEE do mundo, como mostram os dados do relatório *"GHG Emissions of All World Countries"*, publicado em 2024 com base no Banco de Dados de Emissões para Pesquisa Atmosférica (EDGAR, 2024).

Diante desse contexto de alta dependência global de combustíveis fósseis, diversos mecanismos de cooperação e acordos internacionais foram articulados com o intuito de minimizar esses impactos. Um grande marco recente nesse esforço coletivo foi a assinatura do acordo de Paris, onde 196 nações do globo se comprometeram a reduzir suas emissões com o objetivo de manter o aumento da temperatura média global abaixo dos 2 °C acima dos níveis pré-industriais e buscar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso colaboraria na mitigação desses impactos (UNFCCC, 2024).

Mas foi anteriormente com o Protocolo de Quioto, primeiro acordo internacional a estabelecer metas obrigatórias de redução de emissões de gases de efeito estufa para países desenvolvidos, que surgiu o conceito de créditos de carbono. Segundo BNDES (2024) os créditos de carbono, tecnicamente definidos como Certificados de Emissões Reduzidas (CERs), são equivalentes a uma tonelada

de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e) evitada, armazenada ou removida da atmosfera por meio da implementação de um projeto de carbono.

Um projeto de carbono, por sua vez, deve ser pautado na prospecção da linha de base e na busca por comprovar adicionalidade com a implementação do projeto. Segundo o BNDES (2024), a linha de base para uma atividade de projeto são as emissões prospectadas de GEE na ausência da atividade do projeto de carbono proposto. A adicionalidade é um requisito comum a qualquer projeto de carbono e é definida como a diferença entre as emissões previstas na linha de base e as emissões verificadas com o projeto. Portanto, refere-se às reduções dos impactos causados ou de ganhos obtidos além da linha de base.

Foi a partir desse contexto que se estruturou o mercado de carbono, permitindo a negociação desses créditos e a consolidação de duas modalidades: o mercado regulado e o mercado voluntário. O mercado regulado é estabelecido por leis, normas e usualmente impõem limites de emissões de GEE, distribuindo permissões de emissão que diminuem ao longo do tempo e podem ser comercializadas entre as empresas. Esse modelo, conhecido como *cap-and-trade*, visa reduzir as emissões ao menor custo possível para a sociedade, podendo ainda incluir taxações e incentivos. Já, o mercado voluntário não exige cumprimento legal, sendo adotado por empresas e indivíduos que negociam créditos de carbono que são verificados por entidades independentes, mas que seguem padrões reconhecidos internacionalmente, mesmo fora do escopo da regulação formal (Maria, 2024).

No Brasil, esse cenário ganha relevância diante das características da matriz energética nacional. Segundo o relatório de 2026 do Balanço Energético Nacional (BEN) apresentado pela EPE (2026), a matriz energética brasileira tem uma participação de 49,5% de fontes renováveis, um percentual significativamente superior à média mundial de apenas 14,7% de fontes renováveis. Porém, ainda em ambos os cenários, global e nacional, a matriz energética é majoritariamente fóssil. Outro dado importante apresentado pelo BEN é o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira que atingiu 440,2 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e), sendo a maior parte (221 tCO_2e) gerada no setor de transportes. Esse resultado evidencia que o setor de transportes permanece

como um dos principais responsáveis pelas emissões da matriz energética nacional, em razão da elevada dependência de combustíveis fósseis na frota de veículos.

Ao analisar, especificamente, o setor de energia elétrica, observa-se um sistema intensivo em recursos e fortemente baseado em combustíveis fósseis no cenário global. Contudo, a matriz elétrica brasileira, por sua vez, tem uma realidade bastante diferente, com uma participação de renováveis de aproximadamente 86,8% (EPE, 2026).

A partir do contexto brasileiro e mundial, constata-se que projetos de carbono descritos em um PDD (*Project Design Document*) tem grande potencial de gerar CERs (Certificado de Emissões Reduzidas) com oportunidade de transição energética por meio de fontes renováveis, sobretudo biomassa, biogás e, o promissor hidrogênio verde. Entretanto, a avaliação de projetos de crédito de carbono envolve complexidade na decisão, desta forma, a criação de um modelo multicriterial de apoio à decisão se torna necessário.

1.1 Justificativa

A relevância do tema é reforçada pela atualidade e conexão direta com os desafios climáticos contemporâneos. Na Conferência das Partes (COP29), realizada em 2024 em Baku, foi aprovada parte essencial da regulamentação do Artigo 6 do Acordo de Paris, após anos de impasses. Esse marco estabeleceu as bases para o funcionamento de um mercado global de carbono: o artigo 6.2 define regras para a troca de resultados de mitigação entre países, enquanto o 6.4 autoriza que desenvolvedores privados comercializem créditos de carbono sob supervisão da ONU, contribuindo para que os países alcancem suas metas de redução de emissões (MMA, 2024a). Na COP30, realizada em 2025 em Belém-PA, foram registrados avanços complementares, como a recomendação de ampliar o financiamento à adaptação climática e a criação do Mecanismo de Belém para a Transição Global Justa. Entretanto, a conferência também evidenciou desafios persistentes, como a ausência de consenso sobre a eliminação gradual dos combustíveis fósseis e a indefinição quanto ao fortalecimento das Contribuições Nacionalmente Designadas (NDC) e das estratégias climáticas de longo prazo (Waskow *et al.*, 2025).

Apesar do progresso, a implementação efetiva desse mercado global enfrenta desafios significativos. A complexidade em criar normas que sejam aplicáveis a todos os países, mesmo em diferentes níveis de desenvolvimento, além da necessidade de padronizar metodologias e procedimentos, garantir transparência e ainda rastrear as unidades de mitigação transferidas, evidencia a dificuldade em estruturar um sistema internacional de cooperação climática (Prolo *et al.*, 2021).

No contexto brasileiro, em 11 de dezembro de 2024, foi sancionada a Lei nº 15.042 (Brasil, 2024) que instaura o mercado de carbono regulado brasileiro e cria o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). O mercado regulado brasileiro, deste modo, é baseado no modelo *cap-and-trade* e estabelece limites obrigatórios de emissão de GEE. Assim, empresas que emitirem menos do que o permitido podem vender suas Cotas Brasileiras de Emissão (CBEs) para aquelas que excederem seus limites. Diferente do mercado voluntário, esse é obrigatório e fiscalizado, com sanções previstas para quem não cumprir as regras (Brasil, 2024).

Segundo a *International Chamber of Commerce* (ICC), o Brasil apresenta um potencial de geração negociável de créditos de carbono que pode variar, até 2030, entre US\$ 0,5 bilhão e US\$ 100 bilhões. Diante dessa estimativa, o mercado regulado desponta como uma oportunidade estratégica para o Setor Elétrico Brasileiro (SEB) no contexto da transição para uma economia de baixo carbono (ANE, 2022).

A *Green Hydrogen Catapult* (2024), uma aliança formada por sete das maiores empresas do mundo na produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, aponta que atualmente, das 95 milhões de toneladas de hidrogênio produzidas por ano no mundo, cerca de 98% ainda é obtido a partir de combustíveis fósseis, o que resulta em mais de 800 milhões de toneladas de emissões de carbono por ano. Nesse cenário, o hidrogênio verde, produzido por meio de eletrolisadores alimentados por eletricidade limpa e renovável, surge como uma alternativa promissora para substituir o hidrogênio fóssil e viabilizar a descarbonização de setores de difícil eletrificação.

A biomassa também tem grande potencial de descarbonização no setor de energia, por meio de BECCS (*Biomass Energy with Carbon Capture and*

Storage). Segundo o relatório anual da CCS Brasil (2023) as aplicações mais comuns seriam plantas de etanol e de purificação de biogás e termelétricas movidas à biomassa ou biocombustível. O relatório também aponta que o Brasil, por sua forte presença no mercado de etanol e sua capacidade ainda pouco explorada para o biogás, possui um dos maiores potenciais para BECCS no mundo.

A matriz energética global ainda é fortemente dependente de fontes fósseis, com aproximadamente 86% da energia mundial proveniente de recursos não renováveis, como carvão mineral, petróleo e gás natural (IEA, 2023). Essa predominância resulta na emissão massiva de Gases de Efeito Estufa (GEE), contribuindo para a intensificação das mudanças climáticas. Setores de alto consumo energético, como transporte, indústria pesada e geração de energia elétrica, destacam-se pelo uso intensivo desses combustíveis fósseis. Diante desse cenário, torna-se indispensável acelerar a transição energética, promovendo a substituição gradual dessas fontes por energias renováveis e combustíveis de baixo carbono (IEA, 2023).

O biogás é uma fonte energética renovável com diversas aplicações e é obtido a partir da digestão anaeróbica por microrganismos, que é o processo de decomposição de matéria orgânica sob a ausência de oxigênio que ocorre em um sistema fechado ou equipamento que recebe o nome de biodigestor (Induchoodan; Haq; Kalamdhad, 2022). O biogás resultante do processo de digestão anaeróbica é composto majoritariamente por metano (CH_4) e em menor parte por gás carbônico (CO_2), esses gases são capturados nos biodigestores e o metano, com potencial calorífico, é disponível como recurso energético. Além desses dois principais componentes, obtêm-se como subproduto do processo o digestato, um resíduo rico em matéria orgânica que pode ser utilizado como biofertilizante. Outros gases podem estar presentes em pequenas quantidades na composição. As concentrações de metano e de CO_2 no biogás dependem da matéria-prima orgânica que o originou (Kabeyi; Olanrewaju, 2022).

A captura do metano gerado no processo é fundamental para a mitigação das emissões, pois nos casos em que a matéria orgânica se decompõe naturalmente ao ar livre (como em lixões e aterros sem controle), o metano é liberado diretamente na atmosfera. No caso de queima direta do metano seu

impacto climático é reduzido, pois a queima resulta em emissões de CO₂ menos prejudiciais que a liberação direta do metano, mas sem aproveitamento do gás (Kabeyi; Olanrewaju, 2022).

Segundo dados da EPE (2023) a produção de biogás no Brasil está em expansão. O maior número de plantas de biogás em operação no país corresponde ao setor agropecuário, com 77% do número total de plantas em operação. Porém, no âmbito de volume de biogás produzido, o setor de saneamento representa 74% do volume total, devido aos aterros sanitários que representam quase totalidade do volume produzido nesse setor.

Os mesmos dados da EPE apontam que o setor sucroenergético possui o maior potencial de crescimento, em especial o setor de açúcar e etanol, que geram em suas plantas 269 milhões de Nm³/ano, o que corresponde a 5% do potencial estimado, devido ao baixo aproveitamento dos resíduos gerados como a vinhaça e a torta de filtro. Assim, o relatório afirma que as usinas de biogás e biometano brasileiras, em especial as do setor sucroenergético, caso consigam aproveitar ao máximo os seus potenciais energéticos, juntamente associados com iniciativas de captura e armazenamento de carbono (CCS), terão grandes oportunidades de gerar créditos de carbono com a implementação do mercado regulado de carbono brasileiro (EPE, 2023).

O biodiesel é um biocombustível promissor para substituir os combustíveis fósseis em diversas aplicações como em veículos de transporte rodoviários, marítimos, máquinas agrícolas e geradores a biodiesel (Masera; Hossain, 2023). O biodiesel pode ser produzido a partir de óleos vegetais, gordura animal e outros resíduos orgânicos, como óleos alimentares usados. Para a obtenção do biodiesel, as matérias primas são submetidas ao processo de transesterificação, que consiste na reação química dos óleos vegetais ou de gordura animal com um álcool primário (etanol ou metanol) resultando em biodiesel e glicerina como subproduto. Além do método de transesterificação que é o método mais comum, outros métodos como pirólise e emulsificação são empregados para a obtenção do biodiesel (Masera; Hossain, 2023).

No Brasil, desde 2005 é obrigatória a adição de um percentual de biodiesel ao diesel fóssil convencional. A partir de agosto de 2025, esse percentual

passou a ser de 15% de biodiesel, conforme resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) (ANP, 2025). A principal matéria-prima utilizada para produção de biodiesel no Brasil é o óleo de soja, mas outras oleaginosas também são empregadas como milho, girassol, mamona, palma, canola, algodão, babaçu e macaúba (Barros; Jardine, 2021).

O RenovaBio é a Política Nacional de Biocombustíveis do Brasil, que permite que usinas produtoras de biocombustíveis, como etanol e biodiesel, obtenham certificação para gerar Créditos de Descarbonização (CBIOS), com base na redução das emissões de GEE em relação aos combustíveis fósseis equivalentes. Esses créditos devem ser adquiridos, de forma compulsória, por distribuidoras de combustíveis fósseis, como forma de atender às metas individuais de descarbonização estabelecidas pelo programa. Além disso, por se tratarem de ativos ambientais negociados em bolsa de valores, os CBIOS também podem ser adquiridos voluntariamente por empresas ou entidades interessadas (Tiburcio; Macedo; Neto, 2023).

Segundo Massera e Hossain (2023) o uso do biodiesel em substituição ao diesel comum reduzem as emissões de gases HCs (hidrocarbonetos), CO (monóxido de carbono) e CO₂ (dióxido de carbono) quando usados em motores de combustão interna. No entanto, os autores estudaram que dependendo da qualidade do biodiesel empregado pode-se resultar em maiores emissões de gases NO_x (óxidos de nitrogênio) do que os próprios combustíveis fósseis.

Nesse caminho da expansão do uso de biogás e biocombustíveis, surge outra oportunidade para o Brasil de aproveitar seu forte potencial para geração de hidrogênio a partir dessas fontes. Segundo Oliveira (2022), a produção de hidrogênio no Brasil pode ser viabilizada em larga escala a partir da biomassa de diferentes materiais orgânicos através de processos de gaseificação e fermentação da biomassa e por meio da digestão anaeróbica para produção de biogás e posterior produção de hidrogênio. A autora aponta também que a produção de hidrogênio pode gerar créditos de carbono, ao se aproveitar a indústria já consolidada de produção de etanol, como forma de produzir hidrogênio por meio da reforma do etanol e biocaptura de carbono (BioCCS). O hidrogênio a partir do etanol seria destinado principalmente como forma de descarbonizar o setor de transportes por

meio da combustão direta ou por meio de célula de combustível a hidrogênio como forma de eletrificação da frota (Oliveira, 2022).

O hidrogênio pode ser extraído por meio de rotas tecnológicas distintas que empregam diferentes formas de produção para sua obtenção, assim são classificados por cores, considerando os GEEs emitidos no processo e se a produção ocorre com Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) ou não. Segundo a EPE (2021) as cores do hidrogênio são classificadas em: hidrogênio preto que utiliza carvão mineral (antracito) em um processo de gaseificação do carvão sem CCUS; hidrogênio marrom que utiliza carvão mineral (hulha) para obter hidrogênio a partir de sua gaseificação sem CCUS; hidrogênio cinza que é produzido a partir do gás natural sem CCUS; e o hidrogênio azul que utiliza do gás natural e até de outros combustíveis para produção do hidrogênio, mas com CCUS.

Além destes, existem outras classificações como o hidrogênio turquesa quando é produzido pelo processo de pirólise do metano (gás natural), sem emitir diretamente CO_2 , pois gera somente carbono no estado sólido como subproduto. O hidrogênio branco é o hidrogênio natural ou geológico que é encontrado em depósitos subterrâneos; o hidrogênio rosa é quando é produzido com fonte de energia nuclear por processo de eletrólise; e o hidrogênio musgo quando é produzido a partir de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS por meio dos processos de gaseificação, reformas catalítica ou biodigestão anaeróbica (EPE, 2021).

O hidrogênio verde é obtido através da eletrólise da água, resultando em hidrogênio com alta pureza e gás oxigênio como subproduto, com emissões zero de GEEs. Para ser caracterizado como “verde”, a produção do hidrogênio deve utilizar de eletricidade proveniente de fontes renováveis, como solar, eólica e hídricas (Squadrito; Maggio; Nicita, 2023).

De acordo com Anand *et al.*, (2025) existem três métodos de eletrólise da água bem estabelecidos, como a eletrólise alcalina, a eletrólise de membrana de troca de prótons (PEM) e a eletrólise de óxido sólido (SOE). Tais eletrolisadores permitem a obtenção de hidrogênio verde capaz de descarbonizar setores de emissões intensivas de GEE, como o setor de transportes através de veículos movidos a células de combustível e o setor industrial em que hidrogênio pode ser

utilizado como matéria prima em diversos processos industriais, além de possibilitar o armazenamento de energia gerada por fontes renováveis (Anand *et al.*, 2025).

Segundo Viegas (2021), o hidrogênio pode atuar como forma de armazenamento da energia elétrica para suprir a energia gerada por fontes intermitentes, como a solar e a eólica. Esse hidrogênio armazenado pode ser posteriormente utilizado para gerar eletricidade, através de células a combustível, por exemplo. No Brasil, cuja matriz elétrica é majoritariamente renovável e apresenta forte crescimento em geração solar e eólica, esta tecnologia é especialmente interessante para compensar a falta de fornecimento nos períodos em que essas fontes deixam de gerar eletricidade (Viegas, 2021).

Independentemente da tecnologia empregada, a credibilidade dos projetos de carbono, seja ele no mercado voluntário ou regulado, depende da correta determinação da linha de base, da demonstração da adicionalidade e da confiabilidade dos processos de Monitoramento, Relato e Verificação (MRV) (Unterstell; Watanabe Jr, 2023). Os mesmos autores afirmam serem necessários mecanismos robustos de MRV para medir e verificar emissões com precisão, garantindo a integridade para o mercado. Os autores também ressaltam a importância de garantir *compliance* com as regras e fiscalização sujeito a penalidades e sanções para desencorajar a falta de conformidade e evitar manipulação do mercado. Por fim, os autores apontam para maior necessidade de transparência acerca de informações sobre as emissões, a negociação de créditos e o desempenho do mercado para o público (Unterstell; Watanabe Jr, 2023).

Diante desse cenário, torna-se relevante desenvolver estudos que contribuam para o aprimoramento da avaliação de projetos de crédito de carbono, especialmente aqueles capazes de integrar diferentes dimensões envolvidas na tomada de decisão. De acordo com Keeney (1992), problemas de decisão complexos exigem abordagens capazes de considerar simultaneamente múltiplos objetivos e critérios. Nesse contexto, ferramentas de apoio multicriterial à decisão podem contribuir para melhorar a consistência das avaliações, facilitar a comparação entre alternativas e tornar o processo decisório estruturado (Belton; Stewart, 2002).

1.2 Definição do Problema

Embora o Acordo de Paris tenha estabelecido um marco internacional para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), a efetividade desse compromisso ainda enfrenta obstáculos, sobretudo na dificuldade de implementar um sistema internacional aplicável para países com diferentes níveis de desenvolvimento.

Os mercados regulado e voluntário também enfrentam desafios, como a necessidade de assegurar a integridade ambiental dos projetos e a credibilidade dos créditos de carbono emitidos. A adoção de sistemas robustos de MRV é fundamental para garantir a rastreabilidade dos dados e a transparência na mitigação das emissões. Além disso, a prospecção da linha de base e a verificação consistente da adicionalidade continuam sendo pontos críticos na avaliação de projetos de carbono. A avaliação desses projetos também pode envolver critérios técnicos, ambientais, econômicos, metodológicos e de monitoramento. A análise conjunta desses critérios torna o processo de decisão complexo, especialmente quando se busca comparar projetos de diferentes tecnologias e rotas tecnológicas.

Nesse sentido, torna-se necessário o desenvolvimento de um modelo multicriterial de apoio à decisão capaz de integrar esses diferentes critérios em uma abordagem integrada para a avaliação de projetos de crédito de carbono. Posteriormente, a aplicação do modelo em um estudo de caso com projetos reais possibilita verificar a sua consistência, comparar local e globalmente os desempenhos dos projetos nos critérios propostos e analisar a robustez dos resultados.

1.3 Objetivo Geral

Desenvolver e aplicar um modelo multicriterial de apoio à decisão para a avaliação de projetos de crédito de carbono, considerando indicadores relacionados à linha de base e adicionalidade, no contexto dos mercados de carbono influenciados pelo Acordo de Paris.

1.4 Objetivos Específicos

Com base no objetivo geral estabelecido, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) analisar o Acordo de Paris, com foco no Artigo 6 e seus desdobramentos;
- b) caracterizar o atual panorama do mercado de crédito de carbono, examinando o mercado regulado e voluntário em nível internacional e nacional;
- c) apresentar os principais métodos de apoio à decisão aplicados a problemas multicriteriais;
- d) modelar e implementar um sistema multicriterial de apoio à decisão para projetos (PDD) com auxílio à implementação da linha de base e avaliação da adicionalidade; e
- e) aplicar o modelo multicriterial em estudo de caso.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro apresenta a introdução, com os objetivos geral e específicos, a justificativa e a definição do problema. O segundo aborda o Acordo de Paris, os mercados regulado e voluntário de crédito de carbono, no Brasil e no mundo. O terceiro capítulo descreve os métodos de apoio à decisão utilizados. O quarto trata da modelagem e construção do modelo multicriterial. O quinto apresenta o estudo de caso e a análise dos resultados, com a aplicação do modelo. Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões do trabalho, seguido pelas referências.

2 ACORDO DE PARIS E O PANORAMA DOS MERCADOS DE CARBONO REGULADO E VOLUNTÁRIO

O capítulo tem como objetivo contextualizar e aprofundar os principais conceitos e instrumentos relacionados ao Acordo de Paris, aos mercados regulado e voluntário de carbono, destacando o panorama brasileiro e sua relação com a indústria de energia. Também são conceituados e explicitados os principais meios de transição energética para uma economia de baixo carbono, com foco nas potencialidades do setor para gerar créditos de carbono.

2.1 Acordo de Paris

O Acordo de Paris, firmado em 2015 durante a 21^a Conferência das Partes (COP21), representou um marco histórico nas negociações climáticas internacionais. Foi adotado por 195 partes signatárias da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), composta por 194 nações e a União Europeia (UNFCCC, 2024). Atualmente apenas três países ainda não ratificaram formalmente o acordo: Irã, Iêmen e Líbia (UN, 2025).

Recentemente, a decisão dos Estados Unidos da América (EUA) de se retirar do Acordo de Paris reacendeu preocupações globais quanto ao comprometimento internacional com as metas climáticas (NRDC, 2025). A saída dos EUA acarreta preocupação com o esforço coletivo global para o cumprimento das metas do acordo, uma vez que o governo do EUA promove um discurso de incentivo à exploração de reservas de gás e petróleo e de uma maior participação de combustíveis fósseis na matriz energética. Além do fato de ser uma das maiores economias e o segundo maior emissor de GEE do planeta, atrás apenas da China (EDGAR, 2024).

O Acordo de Paris entrou em vigor, em 4 de novembro de 2016, quando o mínimo de 55 partes da convenção ratificaram o documento, que representavam cerca de 55% do total de emissões globais de GEE. (UNFCCC, 2025a). O acordo determinou a redução das emissões, com o objetivo de limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. O acordo também afirma que os países desenvolvidos devem prestar assistência financeira aos países

emergentes e subdesenvolvidos, além de transferência de tecnologias para melhorar a resiliência desses países às mudanças climáticas e a capacidade de mitigação de emissões (UNFCCC, 2024).

Para contribuir com a meta global, cada país signatário do Acordo de Paris deve estabelecer suas próprias metas individuais de redução de emissões, as chamadas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs). Essas metas precisam ser revisadas e intensificadas a cada ciclo de cinco anos, com níveis de mitigação progressivamente mais ambiciosos que os da NDC anterior (WRI, 2024).

A primeira NDC brasileira foi estipulada e entregue com a ratificação do acordo pelo Brasil em 2016 e assumia o compromisso de reduzir as emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005 até 2025 e subsequente redução em 43% até 2030. Para cumprir essa meta, o Brasil se comprometia a aumentar a participação de fontes renováveis em sua matriz energética para 45%, se comprometia também em recuperar e reflorestar 12 milhões de hectares de áreas florestais, além de buscar ampliar a presença de bioenergias sustentáveis na sua matriz energética para 18% até 2030 (MMA, 2021). A NDC brasileira referente ao ano 2035, que foi entregue em 2024 durante a COP29 traz o compromisso ambicioso de reduzir suas emissões líquidas de GEE de 59% a 67% em 2035 em comparação aos níveis de 2005, o que equivale a limitar as emissões em 1050 MtCO₂e e 850 MtCO₂e respectivamente, em 2005 o Brasil emitia cerca de 2500 MtCO₂e (MMA, 2024b).

O *Climate Action Tracker* (2025) avalia as metas, políticas e NDCs dos países signatários do acordo, verificando se seus esforços contribuem decisivamente para atingir as metas globais. Segundo sua análise, o Brasil tem atualmente uma atuação climática classificada como “insuficiente”, em que apesar da redução do desmatamento, o país falha em conter o avanço dos combustíveis fósseis e carece de metas claras para transição energética. A NDC do Brasil apresentada é classificada como “quase suficiente”, mas requer melhorias, e quanto ao objetivo de neutralidade de carbono até 2050, sua meta é considerada “fraca” pela ausência de um plano mais detalhado.

O artigo 6 do Acordo de Paris trata das bases de um mercado global de carbono e cada um de seus itens definem as disposições do acordo. O item 6.2

estabelece um novo instrumento de mercado para o comércio das emissões de GEE, que permite que os países negociem diretamente entre si as suas reduções de emissões, chamadas de *Internationally Transferred Mitigation Outcomes* (ITMOs), tais transações ocorrem de forma bilateral e devem ser contratadas, contabilizadas e informadas à ONU (CEBDS, 2021).

De acordo com Prolo *et al.* (2021), o item 6.2, quando plenamente regulamentado, permitirá a transferência dos chamados “resultados de mitigação” (ITMOs) entre os países. Aqueles que promoverem ações de mitigação e gerarem excedentes de performance em relação à sua NDC poderão transferi-los para países que necessitem. Para evitar dupla contagem, o país que transferir, deverá descontar esses ITMOs do seu balanço de emissões, enquanto o país que os receber poderá utilizá-los para demonstrar o cumprimento de sua NDC. A sua regulamentação mundial, portanto, estabelecerá uma nova forma de transferir as reduções de emissões ou remoções de GEE entre os países (Prolo *et al.*, 2021). Segundo a UNFCCC (2023) deve-se garantir a transparência, integridade ambiental e constante monitoramento dessas transações por meio de análise detalhada dos relatórios submetidos pelos países e de registro internacional que rastreia todos os ITMOs desde a emissão até o uso final ou transferência.

O item 6.4 estabelece o Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável (MDS), também chamado de Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (MCAP), que permite a entidades públicas ou privadas certificar unidades de mitigação de GEE. Esse novo mercado multilateral substituirá o antigo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Quioto e tem como exigências para a emissão de créditos de carbono, que as reduções das emissões do projeto sejam mensuráveis, verificáveis e devem demonstrar adicionalidade (UNFCCC, 2025b).

As atividades de mitigação desenvolvidas seguem regras definidas por um órgão supervisor vinculado ao próprio Acordo. Os créditos certificados podem ser usados por países para cumprir suas metas de NDC. Embora haja certa semelhança com o antigo MDL, o MDS se aproxima mais do modelo de Implementação Conjunta, do inglês *Joint Implementation* (JI), que também operava com projetos de redução de emissões entre países com metas estipuladas, sob aprovação nacional ou de um órgão internacional (Prolo *et al.*, 2021).

Com essa nova implementação do Acordo de Paris, todos os países devem seguir regras rigorosas de contabilização de emissões, de transparência e mensuração, além de possuir metas descritas em sua NDC. Diferente do antigo cenário com o Protocolo de Quioto, em que os países “em desenvolvimento” não tinham tantas exigências de relatar suas emissões à UNFCCC. Essa mudança é um grande desafio para os países “em desenvolvimento” que antes não eram obrigados a manter inventários detalhados, mas, sobretudo, um desafio em âmbito global de implementar esses mecanismos de mercado da mesma forma para todos os países e ainda assim garantir a integridade das reduções e das transferências realizadas (Prolo *et al.*, 2021).

Os itens 6.5 e 6.6 estão relacionados ao mecanismo estabelecido no item 6.4, em que o item 6.5 proíbe a dupla contagem, ou seja, quando os créditos usados por um país comprador não podem ser contabilizados pela parte vendedora. Já o item 6.6 determina que uma parte das receitas obtidas com a venda deve ser destinada a cobrir custos administrativos e financiar a adaptação dos países “em desenvolvimento” mais vulneráveis (UNFCCC, 2023).

O item 6.8 trata de abordagens não baseadas em mercado e não envolve a transação de resultados de mitigação ou unidades de carbono. Os projetos são definidos voluntariamente pelos países participantes e tem o objetivo de promover ações climáticas voluntárias entre os países, por meio de cooperação internacional em áreas como mitigação, adaptação, desenvolvimento sustentável, erradicação da pobreza, financiamento, transferência de tecnologia e capacitação (UNFCCC, 2025c).

2.2 Mercado de Crédito de Carbono

Com o avanço das políticas climáticas globais, os mercados de crédito de carbono tornaram-se instrumentos importantes para a mitigação das emissões de GEE. Esses mercados permitem a negociação de créditos originados a partir de ações que evitam, reduzem ou removem emissões, criando incentivos econômicos para práticas sustentáveis. E, podem ser estruturados de forma regulada ou voluntária.

2.2.1 Mercado Regulado no Mundo

Segundo Trennepohl (2022, p. 45), um mercado regulado de carbono é estruturado por governos nacionais, regionais ou acordos internacionais, com a finalidade de cumprir exigências legais ou normativas. E, de acordo com a autora podem ser baseados em dois tipos de modelos: *cap-and-trade* e *baseline-and-credit*.

No modelo *cap-and-trade*, o governo ou outra autoridade reguladora estabelece um limite máximo de emissões, o “*cap*”. Esse limite é convertido em permissões de emissões, que são distribuídas às empresas/instalações participantes do sistema. Os agentes que emitirem menos que suas permissões podem vender o excedente, enquanto aqueles que ultrapassaram seus limites devem optar por reduzir as suas emissões ou comprar créditos de outros agentes, o “*trade*”. No modelo de *baseline-and-credit*, a autoridade reguladora estabelece uma linha de base que representa um nível de desempenho ou um padrão de emissão considerado como referência para um determinado setor ou atividade. Dessa forma, um agente recebe créditos se tiver um desempenho melhor que a linha de base, que podem ser comercializados no mercado (Trennepohl, 2022, p. 45).

O mercado regulado está no bojo de um Sistema de Comércio de Emissões (ETS), em que cada unidade de emissão representa o direito de emitir um determinado volume de emissões (normalmente, 1 tCO₂e) e pode ser negociada entre as entidades cobertas ou com outros agentes de mercado. Os mercados regulados ETS são estabelecidos em jurisdições, ou seja, podem ser estabelecidos para países, estados, províncias ou regiões (UNEP, 2024).

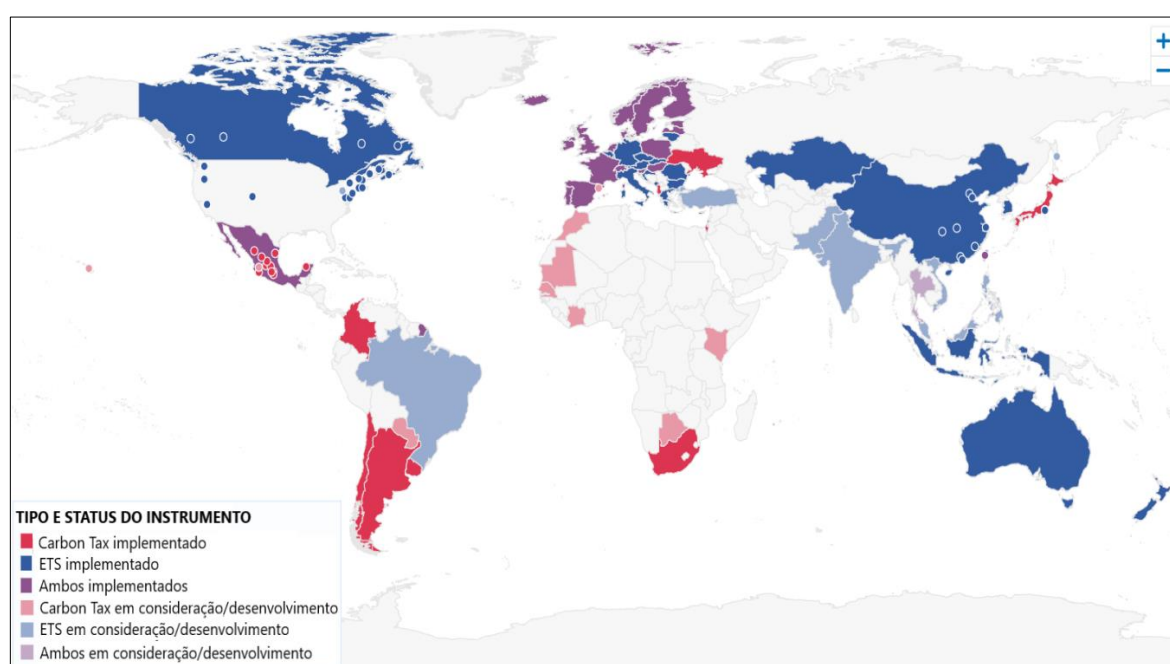
Algumas jurisdições não têm ainda um mercado regulado ETS em seu território, mas conseguem precificar o carbono por meio de um imposto sobre o carbono (*carbon tax*), em que o governo cobra uma taxa das entidades cobertas por suas emissões de GEE, fornecendo um incentivo financeiro para reduzir as emissões. Diante do imposto sobre o carbono, o governo define o preço das emissões. O volume resultante de reduções de emissões alcançado pela política é determinado pela resposta das entidades emissoras ao sinal de preço (NEA, 2025).

De acordo com o Banco Mundial (World Bank, 2025a), que realiza um monitoramento contínuo dos mercados de carbono, atualmente existem 37 Sistemas

de Comércio de Emissões (ETS) em operação. Além disso, há 43 jurisdições que, embora ainda não possuam um mercado regulado, adotam o imposto sobre o carbono como instrumento para precificação das emissões.

Juntos, os ETS e os impostos sobre o carbono (Figura 1) cobrem aproximadamente 14,7 GtCO₂e de emissões de GEE, o que corresponde a 28% das emissões globais de GEE. Desse total, cerca de 23% são provenientes de mercados ETS e 5% resultam da aplicação de impostos sobre o carbono (World Bank, 2025b).

Figura 1 – Status dos Mercados Regulados no Mundo



Fonte: Adaptado de World Bank (2025a).

A Figura 1 apresenta mapeado por cores, os status dos mercados ETS e dos impostos sobre o carbono elaborado pelo Banco Mundial. De acordo com o Banco Mundial (2025a), os instrumentos de precificação do carbono, incluindo os mercados regulados de emissões (ETS) e os impostos sobre o carbono, são classificados em três categorias: implementados, em desenvolvimento e em consideração.

É considerado “*implementado*” quando está em operação, ou seja, foi formalmente adotado por meio de legislação e possui obrigações de conformidade em vigor. Atualmente, existem 37 sistemas de comércio de emissões (ETS) e 43 impostos sobre carbono nesta condição. Classifica-se como “*em desenvolvimento*” quando o governo está trabalhando ativamente na sua implementação, por meio de

uma diretriz oficial estabelecida. No entanto, as entidades reguladas ainda não estão submetidas a obrigações de conformidade. Nesse status, há atualmente 4 ETS e nenhum imposto sobre carbono. Por fim, classifica-se como “*em consideração*” quando o governo anunciou formalmente a intenção de implementar o instrumento, e essa intenção foi oficialmente confirmada. Nesta condição, encontram-se 28 ETS e 14 impostos sobre carbono (World Bank, 2025a).

O Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS) entrou em operação em 2005 e é o primeiro mercado de carbono e por muito tempo foi o maior em operação. Opera em uma jurisdição regional que contempla todos os 27 países-membros da União Europeia e os três países que compõem o Espaço Econômico Europeu (EEE): Islândia, Liechtenstein e Noruega. Além disso, desde 2020 está conectado ao ETS da Suíça. O EU ETS é uma referência para a implementação de outros mercados regulados, atualmente abrange aos setores de geração de eletricidade e calor, industrial, transporte marítimo e aviação. Estabelece limites de emissões cada vez menores como forma estratégia para elevar a ambição climática e acelerar a descarbonização (EU ETS, 2025).

Meadows, Yordi e Vis (2024) abordam sobre um desafio que é enfrentado desde o início do EU ETS, o *carbon leakage* (vazamento de carbono), que ocorre quando empresas transferem sua produção para países com regras climáticas menos rigorosas, a fim de evitar os custos associados ao mercado, o que pode resultar em aumento das emissões globais. Para evitar esse problema, a UE criou o *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM) como uma solução de longo prazo. O CBAM impõe um custo de carbono equivalente ao da EU ETS, sobre as importações de produtos que sejam intensivos em emissões como aço, cimento e fertilizantes, cobrindo as emissões incorporadas nesses bens. Dessa maneira, o CBAM tenta igualar as condições de concorrência entre produtores domésticos e estrangeiros, de forma a garantir que todos enfrentem um preço semelhante sobre suas emissões (Meadows; Yordi; Vis, 2024).

A China, maior emissora de GEE estabeleceu em 2021 seu mercado regulado nacional, o ETS Nacional Chinês. Isso ocorreu após as experiências bem sucedidas das implementações dos oito projetos piloto de mercados regulados subnacionais de carbono: Beijing Pilot ETS, Shanghai Pilot ETS, Shenzhen Pilot ETS,

Tianjin Pilot ETS, Chongqing Pilot ETS, Guangdong Pilot ETS, Hubei Pilot ETS e Fujian Pilot ETS. Estes projetos piloto continuam a operar em paralelo ao ETS Nacional Chinês (ICAP, 2025a).

O ETS Nacional da China é o maior em operação em termos de emissões cobertas, estimadas em cerca de 8 bilhões de tCO₂, que equivale a de 60% de emissões de carbono do país e atualmente regula mais de 3.500 empresas dos setores de energia, aço, cimento e fundição de alumínio com emissões anuais superiores a 26.000 tCO₂. As entidades cobertas devem devolver licenças para todas as suas emissões cobertas (ICAP, 2025a).

Os mercados regulados de carbono estão crescendo, com vários países buscando desenvolver seus próprios sistemas. O Brasil também avança, estando em fase de implementação do seu mercado, alinhando-se às práticas globais de redução de emissões.

2.2.2 Mercado Regulado no Brasil

A Lei nº 15.042/2024, de 11 de dezembro de 2024, instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). A implementação do SBCE ocorrerá de forma gradual, distribuída em cinco fases que abrangem desde a elaboração dos regulamentos até sua plena operação. Na primeira fase, está prevista a elaboração dos regulamentos, com prazo de até dois anos. Na segunda, as empresas deverão estruturar o monitoramento e o relatório de emissões, durante um ano. A terceira fase torna obrigatório esse monitoramento, bem como a comunicação das informações, por um período de dois anos. Em seguida, na quarta fase, ocorre a alocação inicial das licenças, de forma gratuita. Por fim, na quinta fase, o SBCE entra em operação plena (Brasil, 2024).

O SBCE adotará o modelo *cap-and-trade*, no qual são estabelecidos limites máximos de emissões para setores específicos da economia, com a obrigação de que as entidades reguladas possuam licenças proporcionais às suas emissões. No modelo brasileiro é previsto o Plano Nacional de Alocação (PNA) que vai estabelecer os limites máximos de emissões aos setores regulados. Estarão sujeitas às obrigações de conformidade as empresas que emitirem mais de 25 mil

toneladas de CO₂ equivalente por ano, enquanto aquelas que superarem 10 mil toneladas anuais estarão obrigadas apenas ao monitoramento e reporte de suas emissões (ICAP, 2025b).

A princípio, o SBCE deverá abranger a todos os setores da economia, exceto o setor agropecuário que foi excluído, setor este que tem umas das maiores emissões nacionais, com cerca de 27% das emissões brasileiras de GEE. O SBCE contará com dois instrumentos principais: os Certificados de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVE) e a Cota Brasileira de Emissão (CBE). Cada unidade, seja CRVE ou CBE, corresponderá a 1tCO₂e. As CBEs serão distribuídas aos participantes do sistema, podendo ocorrer de forma gratuita ou via leilões, conforme estabelecido pelo Plano Nacional de Alocação (PNA). Já os CRVEs, que representam reduções verificadas de emissões com base em metodologias aprovadas e registradas dentro do SBCE, poderão ser utilizados para cumprimento das metas dos agentes até um limite máximo ainda a ser definido em regulamentação específica (Guitarrari *et al.*, 2025).

Muitas jurisdições adotam impostos sobre o carbono (*carbon tax*) como forma de precificar o carbono, porém, no contexto brasileiro, a legislação proíbe a aplicação de tributos sobre as emissões de GEE provenientes de atividades, instalações ou fontes que estejam submetidas à regulação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) (Guitarrari *et al.*, 2025).

Mas, enquanto, o Brasil ainda não conclui a implementação do SBCE e os novos instrumentos previstos no Artigo 6 do Acordo de Paris, por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável (MDS), ainda estão em fase de consolidação global, o mercado de carbono regulado no Brasil e nos demais países, continua a seguir princípios e etapas semelhantes às aquelas adotadas pelo antigo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Essas etapas incluem: a elaboração do documento de concepção do projeto (*Project Design Document* - PDD), a validação por uma Entidade Operacional Designada (DOE), a aprovação pelas Autoridades Nacionais Designadas (ANDs), o registro pelo Conselho Executivo (CE), o monitoramento das atividades do projeto e, por fim, a verificação, certificação e emissão dos Certificados de Emissões Reduzidas (CERs) (Chen; Letmathe; Soderstrom, 2020).

De acordo com Chen, Letmathe e Soderstrom (2020), a elaboração do *Project Design Document* (PDD) é uma das etapas mais fundamentais de toda a implementação de um projeto de carbono, que fornece toda a base técnica e justificativas para que o projeto possa ser validado, aprovado e registrado. O PDD necessita conter uma descrição detalhada do projeto proposto, incluindo qual a tecnologia utilizada, quais os objetivos de redução das emissões, a localização e os atores envolvidos no projeto. Além disso, o PDD apresenta a linha de base do projeto, que é entendida como o cenário de referência que descreve o que aconteceria na ausência da atividade do projeto, assim a correta definição da linha de base é crucial para calcular a quantidade real de emissões evitadas. O documento, também, especifica as metodologias de monitoramento, determinando como serão medidas, reportadas e verificadas as reduções GEE. Outras seções obrigatórias em seu preenchimento incluem a duração da atividade, o período de crédito proposto, os impactos ambientais potenciais, a consulta pública com as partes interessadas e também uma análise financeira, para demonstrar a viabilidade econômica do projeto com base na receita esperada com a venda de CERs (Chen; Letmathe; Soderstrom, 2020).

Após concluído o PDD, o proponente o submete a uma Entidade Operacional Designada (DOE) para o processo de validação, acompanhado pelas cartas de aprovação emitidas pelas Autoridades Nacionais Designadas (ANDs) dos países envolvidos. Caso validado, o projeto é encaminhado ao Conselho Executivo (CE) para o registro oficial. Após registrado, a próxima fase é o monitoramento, em que o proponente coleta dados e elabora um relatório de monitoramento, que é então verificado por uma segunda DOE através de inspeções *in loco* e verificação documental. Caso os resultados sejam comprovados, a DOE emite um relatório de verificação e certificação. Com base nisto, o CE procede à emissão das CERs, registrando a titularidade dos créditos nos registros nacionais correspondentes. Em meio a todo esse processo está o princípio da adicionalidade, que exige que as emissões evitadas pelo projeto sejam reais e adicionais àquelas que ocorreriam sem o projeto (Chen; Letmathe; Soderstrom, 2020).

Assim, o SBCE marcará um avanço na política ambiental do Brasil, ao criar um instrumento regulado de controle de emissões alinhado às metas climáticas

do país. Sua implementação busca estimular a redução de GEE e promover a transição para uma economia de baixo carbono.

2.2.3 Mercados Voluntários Internacionais

Nesse modelo, não existe uma entidade única que gerencie o mercado, mas, sim, um ecossistema de organizações e certificadores autorregulados que definem padrões de certificação (Spilker; Nugent, 2022). Segundo Vargas *et al.* (2022), o primeiro participante que compõe o mercado voluntário são os desenvolvedores proponentes de projetos, que definem se a atividade será de redução ou remoção de GEE, da metodologia adequada e assim desenvolver o projeto com base em critérios de adicionalidade, mensurabilidade e unicidade dos créditos. Após a elaboração do projeto, é necessário fazer a validação, e os responsáveis por essa etapa são entidades independentes, DOEs (*Designated Operational Entities*) e credenciadas internacionais que vão verificar se o projeto segue corretamente os critérios e metodologias.

Os próximos participantes essenciais são as registradoras de projetos, que seguem padrões (*standards*) próprios para fazer o registro, monitoramento e certificação para cada tipo de projeto. Os padrões mais estabelecidos são o *Verified Carbon Standard* (VCS), *Climate Action Reserve* (CAR), *American Carbon Registry* (ACR) e *Gold Standard* (Spilker; Nugent, 2022). Cada registro tem suas próprias regras ou padrões que determinam como os desenvolvedores de projetos originam seus créditos de carbono por meio de abordagens metodológicas para redução, prevenção e remoção de carbono. Quando um projeto é validado por um registro, são emitidos créditos que quantificam a redução, remoção ou não emissão de uma tonelada de CO₂ em relação ao cenário de linha de base. Esses créditos, também chamados de certificados ou compensações, tornam-se ativos transferíveis dentro do próprio registro. Após feita a negociação, o comprador deve “aposentar” o crédito, assegurando que esse crédito não seja utilizado por nenhuma outra entidade (Spilker; Nugent, 2022).

No mercado voluntário, a demanda e a oferta são impulsionadas pelo setor privado, através de empresas e de organizações não governamentais que aderem ao mercado. Isso ocorre em razão de diversos fatores, como estabelecer

compromissos com metas de redução de emissões frente às exigências de investidores ou como uma forma de se posicionar estrategicamente diante de uma possível regulamentação futura do mercado de carbono. (Trennepohl, 2022, p. 167).

Segundo Nowak (2022) um dos problemas no mercado voluntário é que parte das transações ocorre de forma descentralizada, no modelo *over-the-counter* (OTC), ou seja, negociações diretas entre as partes, sem a intermediação de plataformas especializadas. Segundo ele, tais negociações causam falta de transparência na formação dos preços, baixa liquidez e dificuldade de acesso a financiamentos.

Blaufelder *et al.* (2021) elenca os principais desafios que o mercado voluntário enfrenta, como, o risco de *Greenwashing*, que ocorre quando faltam critérios uniformes e mecanismos de verificação robustos, promovendo uma “brecha” para que empresas usem créditos de carbono apenas para melhorar sua imagem, sem contribuir efetivamente para a redução das emissões. Outro desafio é a baixa integridade e credibilidade, que podem ser ocasionados por falhas nos processos de certificação, monitoramento e verificação dos projetos, que resulta na dupla contagem ou em créditos que não representam reduções reais ou adicionais de emissões. A falta de transparência é apontada pelos autores, também, como um desafio, que ocorre principalmente em negociações OTC, que dificultam o acesso a dados sobre preços, volumes e a qualidade dos créditos comercializados, causando insegurança e baixa confiança nos mercados. A insegurança jurídica é outro desafio, causada quando há ausência de regras globais claras, que podem acarretar interpretações divergentes e falta de reconhecimento institucional dos créditos. Por último, a imprevisibilidade da demanda futura, que pode desestimular investimentos em novos projetos de carbono, já que desenvolvedores de projetos de carbono de longo prazo podem hesitar em iniciar novos projetos sem garantias de que haverá compradores consistentes no futuro (Blaufelder *et al.*, 2021).

Como forma de solucionar tais desafios, Blaufelder *et al.* (2021) propõem algumas soluções. A primeira solução é a definição de padrões de alta qualidade, usando como base os Princípios Fundamentais do Carbono (*Core Carbon Principles*), ou seja, uma garantia que os créditos representem reduções ou remoções reais, adicionais e verificáveis, aumentando assim a confiança nos

projetos. A segunda solução busca uma padronização dos atributos dos créditos, com a criação de uma taxonomia comum, que considere fatores como o tipo de projeto, a localização e características, facilitando aos compradores encontrar créditos alinhados às suas necessidades. A terceira solução apontada é o desenvolvimento de contratos com termos padronizados, como contratos de referência, para promover maior liquidez, eficiência nas negociações e uma precificação mais clara. A quarta solução levantada seria a criação de uma infraestrutura robusta de negociação e pós-negociação, com câmaras de compensação e sistemas digitais que garantam rastreabilidade, proteção contra inadimplência e acesso transparente a dados de mercado. A quinta solução visa assegurar a integridade do mercado, com monitoramento digital contínuo, regras rigorosas de *compliance*, combate a fraudes e a criação de uma entidade de governança para fiscalizar e supervisionar os participantes. Por fim, a sexta solução busca a transmissão de sinais claros de demanda, por meio da formalização dos compromissos de compra de créditos no médio e longo prazo e da criação de registros públicos dessas intenções, o que incentiva o desenvolvimento de novos projetos e atrai mais investimentos (Blaufelder *et al.*, 2021).

Segundo Miltenberger *et al.* (2021) os processos de Monitoramento, Relatórios e Verificação (MRV) são custosos, complexos e podem representar a maior parte do valor de mercado de um crédito de carbono, o que pode acabar desestimulando projetos. A falta de padronização entre mercados voluntários e tipos de projetos dificulta a validação. No entanto, o autor reitera que os avanços tecnológicos dos últimos anos, como sensoriamento remoto via satélite, dispositivos de detecção a laser (LiDAR), dispositivos com Internet das Coisas (IoT), assim como análises por meio de *machine learning* e Inteligência Artificial (IA), são inovações que tendem a reduzir os custos operacionais de MRV e aumentar a precisão e confiabilidade dos dados. Essas tecnologias vão permitir que projetos menores e mais diversificados participem do mercado de carbono, além de incentivar a ampliação de atividades de mitigação climática e resultar em mercados mais confiáveis (Miltenberger *et al.*, 2021).

2.2.4 Mercado Voluntário no Brasil

O mercado voluntário brasileiro atualmente utiliza dos mesmos padrões de certificação que são reconhecidos internacionalmente pelo ICROA (*International Carbon Reduction and Offset Alliance*), uma entidade que reconhece os padrões de certificação que seguem as melhores práticas no mercado voluntário de carbono (Vargas *et al.*, 2021). Os padrões VCS da Verra, Gold Standard e ACR certificam projetos de carbono pelo território nacional, o padrão ACR ainda não certifica nenhum projeto. Embora existam outros padrões que certifiquem projetos no Brasil, o fato de não terem reconhecimento pelo ICROA, reduz a sua aceitação no mercado internacional e sua credibilidade. O que perpetua um cenário dominado por poucos padrões, considerados mais seguros e confiáveis por compradores e desenvolvedores de projetos (Vargas *et al.*, 2021).

Os projetos de carbono do mercado voluntário são divididos em categorias (escopos) e cada um desses escopos compreendem alguns tipos de projetos, essa classificação é feita pelas registradoras para ter melhor organização e credibilidade. No Brasil, há projetos de carbono voluntários que estão classificados nas seguintes categorias: Agricultura, Florestas e Uso da Terra (*Forest and Land Uses*), Energias Renováveis, Transporte, Gestão de Resíduos, Dispositivos Domésticos e Comunitários (*Household e Community Devices*), e por último Eficiência e Troca de Combustíveis (*Ecosystem Marketplace*, 2025).

O banco de dados da *Berkeley Public Policy* (2024) contém todos os registros de projetos de carbono do Brasil e internacionais setorizados de acordo com as categorias ditas anteriormente. A categoria mais relevante no contexto brasileiro é a de Florestas e Uso da Terra, com registro de 152 projetos de carbono de um total de 318 projetos até o ano de 2024. Essa categoria compreende projetos brasileiros de Aflorestamento/Reflorestamento, Gestão Sustentável de Paisagens, Manejo Florestal Melhorado e projetos REDD+. A sigla REDD+ corresponde a Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal, e atividades adicionais relacionadas à conservação e manejo sustentável das florestas. Nesse contexto, a análise de Alves *et al.* (2024) aponta que o Brasil possui grande potencial para se tornar líder mundial no mercado voluntário de créditos de carbono devido à sua vasta cobertura vegetal, à grande disponibilidade de terras para

projetos de restauração, além da preservação como formas de geração de créditos de carbono. Para alcançar esse patamar, os autores apontam que é essencial o país aproveitar o aumento da demanda internacional por créditos de carbono provenientes de florestas e projetos de preservação e além disso, buscar esforços para reduzir o desmatamento e exploração ilegal no país. Renteria (2024) corrobora ao relatar que o Brasil tem o potencial anual de remover e evitar 1 bilhão de toneladas de CO₂ até 2050, a partir de atividades de restauração e conservação.

No Brasil, do total de créditos de carbono da categoria “Florestas e Uso da Terra”, cerca de 95% deles foram provenientes de projetos REDD+, com movimentação de 78,367 milhões de tCO₂e até o ano de 2024 (Figura 2).

Figura 2 – Projetos Mercado Voluntário Brasileiro 2024

Projetos por Escopo e Tipo	Créditos [tCO₂e]	Percentual [%]	Nº de Projetos
Agricultura	575.615	0,4%	32
Florestas e Uso da Terra	82.320.761	61,4%	152
Aflorestamento/Reflorestamento	3.636.491	2,7%	39
Conversão Evitada de Pastagens	316.781	0,2%	1
Manejo Florestal Melhorado	0	0,0%	1
REDD+	78.367.489	58,5%	110
Gestão Sustentável de Pastagens	0	0,0%	1
Doméstico e Comunitário	118.487	0,1%	6
Industrial e Comercial	253.991	0,2%	1
Energia Renovável	40.231.682	30,0%	78
Biomassa	9.438.759	7,0%	50
Hidrelétrica	24.741.108	18,5%	16
RE Bundle	3.268.333	2,4%	3
Solar - Centralizada	0	0,0%	1
Iluminação Solar	0	0,0%	1
Eólica	2.783.482	2,1%	7
Transporte	48.497	0,0%	6
Gestão de Resíduos	10.493.507	7,8%	43
Total Geral	134.042.540	100,0%	318

Fonte: Berkeley Public Policy (2024).

A segunda categoria mais relevante é a de Energias Renováveis que corresponde a 78 projetos referentes a energias “verdes” como biomassa, hídricas,

eólica, solar e *RE Bundle* (combinação de diferentes fontes renováveis no mesmo projeto). O volume total de créditos de energias renováveis também é alto, com 40,232 milhões de tCO₂e, o que equivale a 30,01% do total de créditos brasileiros. Nessa categoria é possível destacar os projetos de carbono provenientes de hidroelétricas que corresponde a 61,5% do total de créditos de carbono das energias renováveis, seguidos por biomassa (23,46%), *RE Bundle* (8,12%) e eólicas (6,92%) (Berkeley Public Policy, 2024).

Segundo dados do *Ecosystem Marketplace* (2024), durante o período de 2020 a 2024, o Brasil teve um volume de créditos gerados a partir de projetos no mercado voluntário de aproximadamente 67,911 milhões de tCO₂e, o que configurou o país como um dos dez maiores do mundo no período. Já quanto ao volume de créditos acumulados até 2024, o país tem 134,042 milhões de tCO₂e, ocupando o 4º lugar no ranking mundial, ficando somente atrás de Estados Unidos, China e Índia respectivamente. Mas caso seja considerado apenas o número de projetos, o Brasil com 318 projetos, cai para a 6ª colocação no ranking mundial, atrás inclusive do México, que embora tenha 396 projetos, correspondem a apenas 17,609 milhões de tCO₂e, o que demonstra que o Brasil tem projetos com alta rentabilidade de créditos de carbono (Berkeley Public Policy, 2024).

Até o final de 2024, o Brasil tinha ao todo 318 projetos de carbono, destes, 283 (88,9%) foram certificados pelo padrão VCS da Verra, 30 (9,4%) certificados pela *Gold Standard* e apenas 5 (1,6%) registrados pelo padrão ACR. O padrão VCS da Verra domina no cenário brasileiro, e um dos motivos para isso é que a maioria dos créditos do mercado voluntário são provenientes de projetos REDD+ (58,45%) e o padrão *Gold Standard* não aceita esse tipo de registro (Berkeley Public Policy, 2024).

Yang e Park (2025) investigaram os desafios de integridade em mercados de carbono ao comparar as metodologias de verificação de projetos REDD+ no bioma amazônico brasileiro, que são utilizadas pela UNFCCC e por certificadoras do mercado voluntário, como a Verra e a Gold Standard (GS). O estudo consistiu em analisar as metodologias de verificação de emissões evitadas (ERs), considerando três elementos críticos: linha de base (*baseline*), vazamento de carbono (*leakage*) e estoques de carbono (*carbon pools*). Os autores mostraram que há diferenças

significativas entre as abordagens: Para o quesito “Linha de Base” a UNFCCC adota uma metodologia baseada em resultados com emissões históricas, enquanto Verra e GS utilizam cenários projetados (*business-as-usual*). No quesito “vazamento”, a UNFCCC considera emissões nacionais totais, enquanto Verra e GS se limitam a áreas próximas ao projeto. Para o quesito “estoques de carbono”, a UNFCCC inclui mais categorias de biomassa, enquanto Verra e GS adotam critérios mais restritos. A partir disso, o estudo estimou os estoques de carbono no bioma amazônico em 2021: 910,9 milhões tCO₂eq (UNFCCC), 757,1 milhões (Verra) e 817,1 milhões (GS). Os autores concluíram que tais diferenças geram riscos à integridade dos créditos de carbono e recomendaram a padronização das metodologias de verificação e alinhamento dos dados com inventários nacionais para garantir a confiabilidade e robustez dos créditos gerados.

De acordo com o levantamento da *Abatable* (2024), o *VCM Investment Attractiveness Index* é um índice internacional que avalia e classifica os países com base na sua atratividade para investimentos no mercado voluntário de carbono. O índice considera na análise três variáveis: as condições de investimento no país, a preparação para participação nos mercados de carbono vinculados ao Artigo 6 do Acordo de Paris e o potencial de geração de benefícios socioambientais por meio dos projetos de créditos de carbono. Em seu ranking mais recente, o Brasil ocupou a 9ª posição, refletindo sua relevância global no mercado voluntário, impulsionada pela ampla disponibilidade de ativos naturais, como florestas, além de uma matriz energética majoritariamente renovável.

2.3 Considerações

O capítulo evidencia como o Acordo de Paris impulsiona uma transformação nas políticas climáticas globais, promovendo instrumentos econômicos e viabilizando os mercados de crédito de carbono no objetivo do cumprimento das metas de redução de emissões. A análise dos mercados de carbono evidenciou a crescente importância desses instrumentos para a precificação do carbono e o incentivo à redução de emissões. No Brasil, destacam-se a criação do SBCE e o fortalecimento do mercado voluntário.

Além disso, foram apresentadas fontes renováveis com potencial para impulsionar a transição energética e a geração de créditos de carbono, como biogás, biometano, biodiesel, hidrogênio verde e biomassa. Esse contexto evidencia a necessidade de ferramentas capazes de apoiar a avaliação e a comparação de projetos de carbono, fundamentando o desenvolvimento do modelo multicriterial apresentado nos capítulos seguintes.

3 MÉTODOS DE APOIO À DECISÃO

Um problema de decisão multicriterial envolve a avaliação integrada de múltiplos objetivos, o que torna o processo decisório mais complexo e demanda a utilização de metodologias de apoio à decisão capazes de auxiliar na análise das alternativas consideradas (Roy, 1996). Segundo Gonzalez, Moreno e Vegas (2019) a dificuldade nas decisões reside na multiplicidade de critérios para avaliar as alternativas, com objetivos que muitas vezes entram em contraposição, devido a diferentes partes interessadas envolvidas na decisão, com preferências e interesses distintos (Gonzalez; Moreno; Vegas, 2019). Segundo Bana e Costa *et al.* (1997) os métodos multicriteriais além de auxiliar na escolha, ordenação e classificação das alternativas, incorporam aspectos relevantes aos envolvidos no processo decisório, ao contrário dos métodos monocritério que têm apenas um objetivo e uma solução ótima, sem considerar tais aspectos.

Os autores Ensslin, Neto e Noronha (2001) consideram primordial que os envolvidos na decisão devam participar da construção do modelo multicriterial para a avaliação das alternativas, pois são eles os atores principais que devem refletir e definir, delimitar o problema a ser resolvido e quais os critérios a serem utilizados na avaliação de alternativas. Busca-se obter um melhor entendimento do modelo daqueles que estão decidindo, visando a estruturação do problema. O objetivo é clarificar os aspectos considerados pelos decisores como fundamentais no processo decisório e identificar a repercussão das alternativas sobre estes aspectos (Ensslin; Neto; Noronha, 2001). Esta abordagem é conhecida como Método Multicriterial de Apoio à Decisão (MCDA), que incorpora diferentes critérios no processo de tomada de decisão por meio de diferentes técnicas analíticas. Isso resulta em soluções diretas e bem ponderadas, pois permite que objetivos conflitantes sejam abordados simultaneamente (Yannis *et al.*, 2020).

De acordo com Marakas (1998), os sistemas de apoio à decisão são desenvolvidos para auxiliar um ou mais decisores durante o processo decisório. Esses sistemas disponibilizam ferramentas e recursos organizados que contribuem para a estruturação de problemas não estruturados, permitindo que as decisões sejam tomadas de forma mais eficaz e fundamentada.

Nas seções seguintes, são apresentados e discutidos os principais métodos de apoio à decisão utilizados neste trabalho e que servirão de base para a modelagem multicriterial e aplicação do estudo de caso. São descritos no contexto da análise multicriterial, o método AHP, a MAUT, o Direct Rating, destacando seus fundamentos teóricos e suas principais características no contexto da análise multicriterial.

3.1 Método AHP

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), proposto por Thomas L. Saaty na década de 1970, permanece como uma das técnicas mais difundidas e aplicadas em problemas de apoio à decisão. Estudos recentes demonstram que o método continua sendo amplamente empregado em diferentes áreas do conhecimento e constantemente aperfeiçoado por meio de extensões e abordagens híbridas, mantendo sua relevância na literatura científica (Madzík; Falát, 2022; Petrillo *et al.*, 2023; Ashour *et al.*, 2024).

O método AHP é baseado na organização dos elementos do problema em uma estrutura hierárquica. Nessa estrutura, os critérios e alternativas são avaliados por meio de comparações paritárias, permitindo que o decisor julgue cada aspecto do problema de forma isolada, para tomar uma decisão assertiva. E, a maneira mais eficaz de estabelecer o julgamento é por meio da comparação de um par de elementos por vez (Saaty, 1980). A sua abordagem é baseada em uma escala numérica de comparação par a par que estabelece o quanto um critério ou nível de impacto é preferível em relação ao outro. A escala numérica varia em valores de 1 a 9 por meio do julgamento semântico de um nível de impacto ou critério, p , sobre outro critério, q , que estejam sob o mesmo nível hierárquico (Saaty, 2008). A Tabela 1 apresenta a escala numérica de comparação par a par, também conhecida como escala Saaty.

Tabela 1 – Escala Saaty

$v(p,q)$	Julgamento Semântico
1	Preferência de p sobre q é indiferente
3	Preferência de p sobre q é fraca
5	Preferência de p sobre q é moderada
7	Preferência de p sobre q é forte
9	Preferência de p sobre q é absoluta

Fonte: Adaptado de Saaty (2008).

A partir do julgamento do decisor é construída a matriz de concordância ou também chamada de matriz de julgamentos, de tal forma que cada elemento que compõe a matriz é estabelecido pelo julgamento da preferência do decisor entre o nível de impacto da linha, p , em relação ao nível de impacto da coluna, q . Essa matriz constitui a base para a determinação das prioridades no método AHP (Saaty, 1980; Cavallo; Mazurek; Ramík, 2024).

Por exemplo, o elemento $v_{1,2}$ da matriz representa a preferência que o decisor atribui ao nível de impacto N1 (linha 1) em relação ao nível de impacto N2 (coluna 2) como é possível ver à esquerda na Figura 3.

Figura 3 – Matriz de Concordância para Níveis de Impacto ou Critérios

	N_1	N_2	...	N_j
N_1	$v_{1,1}$	$v_{1,2}$	...	$v_{1,q}$
N_2	$v_{2,1}$	$v_{2,2}$	...	$v_{2,q}$
...	...	...	...	...
N_j	$v_{p,1}$	$v_{p,2}$	...	$v_{p,q}$

	C_1	C_2	...	C_j
C_1	$v_{1,1}$	$v_{1,2}$	...	$v_{1,q}$
C_2	$v_{2,1}$	$v_{2,2}$	...	$v_{2,q}$
...	...	...	...	...
C_j	$v_{p,1}$	$v_{p,2}$	...	$v_{p,q}$

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

Caso o método AHP seja empregado no julgamento da preferência entre níveis de impacto de um mesmo critério é possível obter o desempenho econômico de cada nível de impacto, sendo portanto, uma abordagem intracritério. Assim, é possível determinar o desempenho econômico de uma alternativa em cada critério avaliado, pois um critério possui níveis de impacto, que são ancorados entre o melhor desempenho possível e o pior aceitável.

Caso o método seja empregado no julgamento de preferência entre diferentes critérios, é possível obter o *trade-off* desses critérios sob um mesmo nível

hierárquico, sendo portanto uma abordagem intercritério. À esquerda na Figura 3 é exemplificada uma matriz de concordância construída para níveis de impacto, enquanto à direita uma matriz de concordância construída para critérios.

Os elementos da diagonal principal da matriz serão 1, uma vez que está sendo comparado o mesmo critério ou nível de impacto entre si (Figura 4). A matriz triangular inferior é o inverso da matriz triangular superior, sendo calculado pela Equação (1) (Saaty, 2008).

$$v_{p,q} = \frac{1}{v_{q,p}} \quad (1)$$

Figura 4 – Matriz de Concordância

1	$v_{1,2}$	$v_{1,3}$	$v_{1,4}$
$\frac{1}{v_{1,2}}$	1	$v_{2,3}$	$v_{2,4}$
$\frac{1}{v_{1,3}}$	$\frac{1}{v_{2,3}}$	1	$v_{3,4}$
$\frac{1}{v_{1,4}}$	$\frac{1}{v_{2,4}}$	$\frac{1}{v_{3,4}}$	1

Fonte: Adaptado de Saaty (2008).

3.1.1 Auto-Vetores

Seja uma matriz de comparações paritárias de ordem n , construída segundo a escala fundamental de Saaty, em que cada elemento $v(p,q)$ representa a intensidade de preferência do nível de impacto da linha, p , em relação ao nível de impacto da coluna, q . Saaty e Vargas (2006) apresentaram matematicamente uma forma de determinação dos auto-vetores das linhas da matriz de julgamento por meio de aproximação geométrica. Dessa forma, o auto-vetor associado a cada linha, p , da matriz de concordância é calculado por meio da Equação (2) (Saaty; Vargas, 2006).

$$\gamma_p = \sqrt[d_m]{\prod_q (v_{p,q})} \quad (2)$$

Em que, γ_p é o auto-vetor da linha j da matriz de concordância; d_m é a dimensão da matriz de concordância; e $v_{p,q}$ é a intensidade da preferência entre o nível de

impacto (ou critério) da linha “ p ” em relação ao nível de impacto (ou critério) da coluna “ q ”.

Os auto-vetores associados às linhas da matriz de comparações paritárias são então normalizados por meio da Equação (3), de modo a obter as importâncias relativas dos níveis de impacto (Saaty; Vargas, 1984).

$$\vec{\gamma}_j^{Norma} = \frac{\gamma_j}{\sum \gamma_j} \quad (3)$$

Em que, $\vec{\gamma}_j^{Norma}$ é o auto-vetor normalizado da linha “ j ” da matriz de concordância; e γ_j é o Auto-Vetor da linha “ j ” da matriz de concordância.

3.1.2 Máximo Autovalor

Segundo o Teorema de Perron-Frobenius, existe um único auto valor máximo na matriz e este deve ser sempre maior ou igual à dimensão da matriz. Seja uma matriz quadrada de ordem n , então $\lambda^{máx} \geq n$ (Pillai; Suel; Cha, 2005).

Shiraishi e Obata (2025) analisaram diferentes métodos numéricos para a determinação do autovalor máximo de uma matriz de concordância do método AHP. Nessa análise, os autores também apresentaram o cálculo clássico por aproximação geométrica elaborado por Thomas Saaty, em que o autovalor máximo pode calculado através da multiplicação vetorial entre os auto-vetores normalizados e os somatórios de cada coluna da matriz de concordância, conforme a Equação (4).

$$\lambda_{máx} = \vec{\gamma}_j^{Norma} \cdot \vec{\beta}^T \quad (4)$$

Em que, $\lambda_{máx}$ é o autovalor máximo da matriz de concordância; $\vec{\gamma}_j^{Norma}$ é o Auto-Vetor normalizado da linha “ j ” da matriz de concordância; e $\vec{\beta}^T$ é o vetor transposto do somatório das colunas da matriz de concordância.

E, o vetor $\vec{\beta}$ é definido como:

$$\vec{\beta} = \sum_p v_{p,q} \quad (5)$$

Como forma de ilustrar o cálculo do autovalor máximo, foi apresentado na Figura 5, uma matriz de concordância de ordem $n=3$, contendo os cálculos preliminares dos autovetores normalizados, e de β para obter o autovalor máximo.

Figura 5 – Exemplo Cálculo Variáveis de Matriz de Concordância Ordem $n=3$

	N₁	N₂	N₃	Autovetor	Norma
N₁	1	v_{1,2}	v_{1,3}	$\gamma_1 = \sqrt[3]{1 \cdot v_{1,2} \cdot v_{1,3}}$	$\frac{\gamma_1}{\sum \gamma_j}$
N₂	$\frac{1}{v_{1,2}}$	1	v_{2,3}	$\gamma_2 = \sqrt[3]{\frac{1}{v_{1,2}} \cdot 1 \cdot v_{2,3}}$	$\frac{\gamma_2}{\sum \gamma_j}$
N₃	$\frac{1}{v_{1,3}}$	$\frac{1}{v_{2,3}}$	1	$\gamma_3 = \sqrt[3]{\frac{1}{v_{1,3}} \cdot \frac{1}{v_{2,3}} \cdot 1}$	$\frac{\gamma_3}{\sum \gamma_j}$
SOMA	$\beta_1 = 1 + \frac{1}{v_{1,2}} + \frac{1}{v_{1,3}}$	$\beta_2 = v_{1,2} + 1 + \frac{1}{v_{2,3}}$	$\beta_3 = v_{1,3} + v_{2,3} + 1$	$\sum \gamma_j$	1
$\lambda_{m\acute{a}x} = \vec{\gamma}_j^{Norma} \cdot \vec{\beta}^T = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) \cdot (\beta_1, \beta_2, \beta_3)^T = \gamma_1 \cdot \beta_1 + \gamma_2 \cdot \beta_2 + \gamma_3 \cdot \beta_3$					

Fonte: Elaboração Própria (2026).

3.1.3 Coeficiente de Racionalidade

Uma vez construída a matriz de comparações paritárias, busca-se verificar a consistência dos julgamentos do decisor por meio do Coeficiente de Racionalidade (CR), por meio da Equação (6) (Saaty, 1980; Saaty, 1990). O Índice de Consistência (IC) é um valor determinado por Saaty correspondente à ordem da matriz de concordância e pode ser encontrado na Tabela 2 (Saaty, 1980).

$$CR = \frac{1}{I_c} \cdot \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - d_m}{d_m - 1} \quad (6)$$

Em que, CR é o Coeficiente de Racionalidade da matriz de concordância; d_m é a dimensão da matriz de concordância; I_c é o Índice de Consistência da matriz; e $\lambda_{m\acute{a}x}$ é o maior auto-valor da matriz.

Tabela 2 – Índice de Consistência

d_m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I_c	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

A matriz de julgamentos é considerada consistente para valores de CR inferiores a 10% e inconsistente para valores de CR superiores a 10%. Em caso de inconsistência, o decisor deve rever seus julgamentos de comparação par a par (Saaty 1994). Pant *et al.* (2022) fez uma revisão sobre o índice de consistência do método AHP e outros índices de consistência estudados na literatura recentemente e concluiu que a maior desvantagem na consistência do método está relacionada a um grande número de comparações par a par, que pode ocasionar erros e menor consistência. O estudo de Kuo e Chen (2023) também analisou a consistência de matrizes de comparação paritárias, concluiu que para uma matriz de julgamento AHP ser consistente, é importante escolher decisores qualificados, pois um decisor pode apresentar julgamentos tendenciosos.

3.1.4 Função de Valor Econômico

Os autovetores obtidos pelo método AHP podem ser posteriormente transformados em uma função de valor por meio da normalização linear (*min-max*), permitindo representar os níveis de impacto em uma escala cardinal variando entre 0 e 1 e compatibilizar os resultados com as demais etapas do modelo multicritério, procedimento amplamente empregado em métodos de apoio multicritério à decisão (Triantaphyllou, 2000; Greco; Figueira; Ehrgott, 2009). A função de valor para o método AHP é então calculada por meio da normalização não proporcional dos autovetores para cada nível de impacto, conforme a Equação (7).

$$v(\cdot) = \frac{\gamma_j - \min \gamma_j}{\max \gamma_j - \min \gamma_j} \quad (7)$$

Em que, $v(\cdot)$ é a função valor econômico; γ_j é o autovetor “j” da matriz de concordância; $\min \gamma_j$ é o autovetor com menor valor da matriz de concordância; e $\max \gamma_j$ é o autovetor com maior valor da matriz de concordância.

3.2 Método MAUT (*Multiple Attribute Utility Theory*)

O método MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*), ou Teoria da Utilidade Multiatributo, é uma das principais abordagens utilizadas na análise multicriterial de apoio à decisão. Desenvolvido a partir dos trabalhos de Keeney e Raiffa (1993), o

método permite avaliar alternativas considerando simultaneamente múltiplos critérios, incorporando as preferências do decisor por meio de funções de utilidade.

A principal característica do MAUT é possibilitar a agregação de critérios expressos em diferentes unidades de medida em uma única medida de desempenho global. Para isso, os valores originais dos descritores são transformados em funções de valor normalizadas, que representam a atratividade de cada alternativa em relação aos objetivos do decisor. Dessa forma, os critérios podem ser comparados e combinados de maneira consistente dentro de um mesmo modelo de decisão (Keeney; Raiffa, 1993).

No contexto deste trabalho, o método MAUT será empregado no cálculo das funções de valor dos critérios quantitativos do modelo multicriterial e posteriormente aplicado ao estudo de caso para a avaliação dos projetos de crédito de carbono. Através do método, os desempenhos dos descritores são convertidos em funções de valor comparáveis, permitindo a integração em uma única estrutura de avaliação.

3.2.1 Matriz de Indiferença

Uma etapa intermediária da metodologia MAUT consiste na determinação da matriz de indiferença, que representa a normalização não proporcional dos desempenhos das alternativas em um determinado descritor. Alguns autores chamam de normalização linear do tipo Min-Máx (Triantaphyllou, 2000). Essa etapa tem como objetivo transformar valores originalmente expressos em diferentes unidades de medida para uma escala comum, variando entre 0 e 1, permitindo posteriormente a agregação dos critérios no modelo multicriterial (Hwang; Yoon, 1981).

O cálculo de K depende da natureza do descritor avaliado. Quando o descritor é classificado como crescente, valores mais elevados representam desempenhos mais desejáveis. É o caso, por exemplo, do descritor "Eficiência na Geração de Eletricidade (%)", em que o objetivo é maximizar a eficiência energética do projeto. Nessa situação, para alternativa que apresenta o maior valor (melhor possível) será determinado um valor de $K=1$, enquanto para alternativa com o menor

desempenho (pior aceitável) será determinado um valor de $K=0$ (Hwang; Yoon, 1981). As demais alternativas assumem valores intermediários proporcionais ao seu desempenho entre esses dois extremos, conforme Equação (8) (Teixeira; Belderrain, 2011).

$$K = \frac{N_{ij}(a_n) - \min N_{ij}(a_n)}{\max N_{ij}(a_n) - \min N_{ij}(a_n)} \quad (8)$$

Em que, K é o valor normalizado da alternativa a_n no descritor “ i ”, no nível de impacto N_j ; $N_{ij}(a_n)$ é o valor da alternativa a_n para o descritor “ i ”, em sua unidade de medida original; $\min N_{ij}(a_n)$ é o menor do descritor “ i ” entre as alternativas a_n , em sua unidade de medida original; e $\max N_{ij}(a_n)$ é o maior do descritor “ i ” entre as alternativas a_n , em sua unidade de medida original.

Por outro lado, quando o descritor é classificado como decrescente, valores menores representam desempenhos mais desejáveis. Um exemplo é o descritor "Fator de Emissão de CO₂ por Calor Gerado (tCO₂/GJ)", em que o objetivo é minimizar as emissões associadas à geração de energia. Nesse caso, a alternativa com o menor valor (menor emissão) obtêm um $K=1$, enquanto a alternativa com o maior valor (maior emissão) obtêm um $K=0$ (Hwang; Yoon, 1981). As demais alternativas recebem valores intermediários compreendidos entre esses limites conforme Equação (9) (Teixeira; Belderrain, 2011).

$$K = \frac{\max N_{ij}(a_n) - N_{ij}(a_n)}{\max N_{ij}(a_n) - \min N_{ij}(a_n)} \quad (9)$$

Em que, K é o valor normalizado da alternativa a_n no descritor “ i ”, no nível de impacto N_j ; $N_{ij}(a_n)$ é o valor da alternativa a_n para o descritor “ i ”, em sua unidade de medida original; $\min N_{ij}(a_n)$ é o menor valor do descritor “ i ” entre as alternativas a_n , em sua unidade de medida original; e $\max N_{ij}(a_n)$ é o maior valor do descritor “ i ” entre as alternativas a_n , em sua unidade de medida original.

3.2.2 Função de Valor Econômico

A função de valor para o método MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*) é determinada por uma equação exponencial parametrizada por um coeficiente α (alfa)

previamente definido pelo decisor. O coeficiente, α , definido como coeficiente de propensão ou aversão é arbitrado pelo decisor de forma *ex-ante*. Ao atribuir um valor de α positivo ($\alpha > 0$), o decisor apresenta comportamento propenso aos melhores desempenhos, buscando se aproximar dos melhores resultados possíveis. Ao arbitrar um valor de α negativo ($\alpha < 0$), o decisor apresenta comportamento avesso aos piores desempenhos, buscando se afastar dos piores resultados aceitáveis. O decisor pode ainda ser indiferente, ao atribuir um valor de α nulo ($\alpha = 0$) (Sica *et al.*, 2010).

Ou seja, na metodologia MAUT o decisor ou conjunto de decisores já pré-definem o comportamento à ex-ante (avesso, propenso ou indiferente) ao atribuir um valor numérico à alfa, de tal forma que é possível dizer que o comportamento é formado à ex-ante. Os valores normalizados das alternativas, representados por K , são empregados também na equação da função de valor, conforme a Equação 10 (Sica *et al.*, 2010).

$$v_i(a_n) = \frac{e^{\alpha_i \cdot K} - 1}{e^{\alpha_i} - 1} \quad (10)$$

Em que, $v_i(a_n)$ é a função de valor da alternativa a_n no critério “ i ”; α é o coeficiente de propensão ou aversão do critério “ i ”; e K é o valor normalizado da alternativa a_n no critério “ i ”.

Caso o decisor atribua um comportamento indiferente ao critério, a função de valor para cada alternativa será o próprio valor normalizado da alternativa (K), conforme a Equação 11 (Sica *et al.*, 2010).

$$v_i(a_n) = K \quad (11)$$

Em que, $v_i(a_n)$: é a função de valor da alternativa a_n no critério “ i ”; K é o valor normalizado da alternativa a_n no critério “ i ”.

3.3 Método *Direct Rating*

O método *Direct Rating* (valoração direta) é uma técnica bastante utilizada em modelagens multicriteriais de apoio à decisão, especialmente em problemas qualitativos ou sem dados numéricos objetivos. A metodologia permite atribuir

valores diretamente às alternativas ou aos critérios com base no julgamento subjetivo do decisor (Gomes; Araya; Carignano, 2004).

Neste método, o decisor atribui “notas” ou pontuações diretamente aos níveis de impacto de um critério, refletindo o seu grau de preferência, importância ou desempenho que cada uma possui em relação ao objetivo da decisão (Gomes; Araya; Carignano, 2004). As notas atribuídas diretamente pelo decisor podem posteriormente ser transformadas em uma função de valor por meio da normalização linear não proporcional (*min-max*), permitindo representar os níveis de impacto em uma escala cardinal entre 0 e 1 e compatibilizar os resultados com as demais etapas do modelo multicritério (Triantaphyllou, 2000; Greco; Figueira; Ehrgott, 2009).

$$v_i(a_n) = \frac{N_{ij}(\text{nota}) - \min N_{ij}(\text{nota})}{\max N_{ij}(\text{nota}) - \min N_{ij}(\text{nota})} \quad (12)$$

Em que, $v_i(a_n)$ é a função de valor da alternativa a_n no critério “ i ”, para cada nível de impacto N_j ; $N_{ij}(\text{nota})$ é o valor da nota atribuída ao nível de impacto N_j ; $\min N_{ij}(\text{nota})$ é a menor nota atribuída a um nível de impacto N_j ; e $\max N_{ij}(\text{nota})$: é a maior nota atribuída a um nível de impacto N_j .

Segundo Belton e Stewart (2002), o método apresenta vantagens como a simplicidade em atribuir valores às alternativas e poder ser aplicado a critérios quantitativos e qualitativos. A desvantagem citada é sua subjetividade, pois depende fortemente da coerência do julgamento do decisor e baixa robustez.

Na modelagem e no estudo de caso será utilizado o método *Direct Rating* para realizar os *trade-offs* entre os Pontos de Vista Fundamentais (PVFs). A formulação do cálculo de *trade-off* por *Direct Rating* é apresentado no tópico “3.4.2 - *Trade-off* por *Direct Rating*”.

3.4 Trade-off

No contexto de modelos multicriteriais, o *trade-off* é definido como a contribuição relativa de cada critério para a avaliação global das alternativas. Segundo Ensslin, Neto e Noronha (2001) os *trade-offs* são também chamados de taxas de substituição e representam a perda de desempenho que um decisor está disposto a sacrificar para compensar o ganho em outro critério. Dessa forma, os

trade-offs permitem integrar as avaliações locais dos critérios em uma avaliação global, refletindo as preferências do decisor quanto à relevância relativa dos diversos aspectos considerados no modelo.

3.4.1 AHP

A aplicação do método AHP entre descritores sob um mesmo nível hierárquico ou entre Pontos de Vista Fundamentais (PVFs) sob um mesmo nível hierárquico possibilita obter os *trade-offs* entre eles (Figura 6).

Figura 6 – Método AHP para Descritores ou PVFs

	D ₁	D ₂	...	D _j
D ₁	v _{1,1}	v _{1,2}	...	v _{1,q}
D ₂	v _{2,1}	v _{2,2}	...	v _{2,q}
...	...	...	...	...
D _j	v _{p,1}	v _{p,2}	...	v _{p,q}

	PVF ₁	PVF ₂	...	PVF _j
PVF ₁	v _{1,1}	v _{1,2}	...	v _{1,q}
PVF ₂	v _{2,1}	v _{2,2}	...	v _{2,q}
...	...	...	...	...
PVF _j	v _{p,1}	v _{p,2}	...	v _{p,q}

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

No método AHP, a importância relativa dos critérios ou descritores pode ser obtida a partir da normalização proporcional dos autovetores calculados para a matriz de comparações paritárias. Esse procedimento consiste em dividir cada autovetor pelo somatório dos autovetores, resultando em um vetor de prioridades cuja soma é igual a 1 ou, quando expresso em porcentagem, igual a 100% (Saaty, 1980; Saaty, 1990). No contexto da abordagem de Ensslin, Neto e Noronha (2001), tais importâncias relativas são interpretadas como *trade-offs* e representam a importância relativa de cada descritor ou Ponto de Vista Fundamental (PVF) e podem ser calculados pela Equação (13).

$$w_j = \frac{\gamma_j}{\sum \gamma_j} \cdot 100\% \quad (13)$$

Em que, w_j é o *trade-off* do descritor ou Ponto de Vista Fundamental “j”; γ_j é o autovetor “j” da matriz de concordância para um descritor ou Ponto de Vista Fundamental “j”; e $\sum \gamma_j$ é o somatório dos autovetores da “j” linhas da matriz de concordância para um descritor ou Ponto de Vista Fundamental “j”.

Sendo que:

$$\sum_{i=1} w_i = 100\% \quad (14)$$

Em que, $\sum_{i=1} w_i$ é o *trade-off* dos PVF ou do descritor “i”.

3.4.2 Direct Rating

O método *Direct Rating* pode ser aplicado na obtenção de *trade-offs* entre Pontos de Vista Fundamentais (PVFs) ou entre descritores que compõem um mesmo PVF. O processo consiste em atribuir notas para os PVFs ou para os descritores e posteriormente, normalizar proporcionalmente conforme a Equação (15) (Teixeira; Belderrain, 2011).

$$w_i = \frac{nota_i}{\sum nota_i} \quad (15)$$

Em que, w_i é o *trade-off* do PVF ou do descritor “i”; e $nota_i$ é o valor da nota atribuída ao PVF ou descritor “i”.

Ressalta-se uma diferença entre a aplicação do método de *Direct Rating* para níveis de impacto, em que obtêm-se a função de valor através da normalização não-proporcional, enquanto na aplicação de *Direct Rating* para PVFs ou para descritores sob um mesmo PVF, obtêm-se o *trade-off* através de normalização proporcional.

3.5 Agregação Aditiva

O valor global de uma alternativa, $V(a_n)$, é calculado através da Equação (16), obtido a partir dos desempenhos da alternativa em cada um dos critérios do modelo e ponderadas pela importância relativa de cada critério, *trade-offs*. Esse procedimento permite integrar os desempenhos locais obtidos em cada critério em uma única medida de desempenho global, possibilitando a comparação entre as alternativas avaliadas (Ensslin; Neto; Noronha, 2001).

$$V(a_n) = w_1 \cdot v_1(a_n) + w_2 \cdot v_2(a_n) + w_3 \cdot v_3(a_n) + \dots + w_i \cdot v_i(a_n) \quad (16)$$

Ou de forma genérica pela Equação 17

$$V(a_n) = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot v_i(a_n)) \quad (17)$$

Em que, $V(a_n)$ é o Valor Global de uma alternativa a_n ; $v_i(a_n)$ é o desempenho da alternativa a_n em um critério “ i ”; e w_i é o *trade-off* do critério “ i ”.

Quanto maior o valor global obtido, melhor é o desempenho da alternativa em relação ao conjunto de critérios considerados. Dessa forma, a agregação aditiva permite ordenar e comparar as alternativas, apoiando a seleção daquela que apresenta o melhor desempenho global segundo as preferências incorporadas ao modelo multicriterial.

3.6 Considerações

Neste capítulo foram apresentados os principais métodos de apoio à decisão utilizados neste trabalho. Foram abordados os fundamentos do método AHP, do método MAUT e do método *Direct Rating*, assim como os procedimentos para determinação das funções de valor, dos *trade-offs* e por fim, a agregação aditiva, que permite a avaliação global das alternativas.

Os métodos descritos ao longo deste capítulo constituem a base teórica e metodológica para o desenvolvimento do modelo multicriterial de apoio à decisão e para a aplicação do estudo de caso desenvolvido neste trabalho. Para sua efetiva aplicação ao problema de decisão proposto, torna-se necessária a implementação de um modelo multicriterial capaz de estruturar os critérios de avaliação, representar as preferências do decisor e consolidar os resultados obtidos.

4 MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO

Um modelo multicriterial é uma ferramenta capaz de apoiar problemas de decisão caracterizados pela presença de múltiplos critérios de avaliação, permitindo avaliar as alternativas existentes e identificar melhorias (Roy, 1993). Segundo Roy (1993) o objetivo da modelagem é gerar conhecimento aos decisores sobre o problema decisório e que o modelo seja considerado útil, de forma a garantir credibilidade nos resultados obtidos.

Para Belton e Stewart (2002) a modelagem multicriterial tem como principal objetivo representar de forma estruturada um problema complexo de decisão, permitindo que os diversos critérios envolvidos sejam analisados de maneira integrada. Além de facilitar a comparação entre alternativas, essa abordagem contribui para aumentar a consistência do processo decisório, reduzindo a influência de avaliações puramente subjetivas. Dessa forma, os modelos multicritério auxiliam os decisores na compreensão do problema e na identificação das alternativas que melhor atendem aos objetivos estabelecidos.

A construção de um modelo multicriterial parte de um problema decisório não estruturado e que, portanto, necessita de organização da informação. Segundo Ensslin, Neto e Noronha (2001) um modelo multicriterial deve ser organizado em uma estrutura arborescente composta por Pontos de Vista Fundamentais (PVFs). Aos PVFs são associados descritores, que são critérios de avaliação mensurados por meio de uma função de valor ou utilidade (Ensslin; Neto; Noronha, 2001).

O objetivo principal desse modelo multicriterial é a avaliação integrada de projetos de carbono baseados em fontes renováveis de energia. O modelo foi organizado em Pontos de Vista Fundamentais compostos por critérios pautados na prospecção da linha de base, na comprovação da adicionalidade e na robustez dos sistemas de Monitoramento, Relato e Verificação (MRV). A modelagem, também, incorpora critérios técnicos, ambientais, econômicos e de mercado de carbono, permitindo uma análise abrangente das alternativas avaliadas.

A modelagem dos Pontos de Vista Fundamentais (PVFs) e a construção de seus respectivos descritores, associados a escalas de desempenho são descritos ao longo deste capítulo. Posteriormente, no Capítulo 5, referente ao estudo de caso,

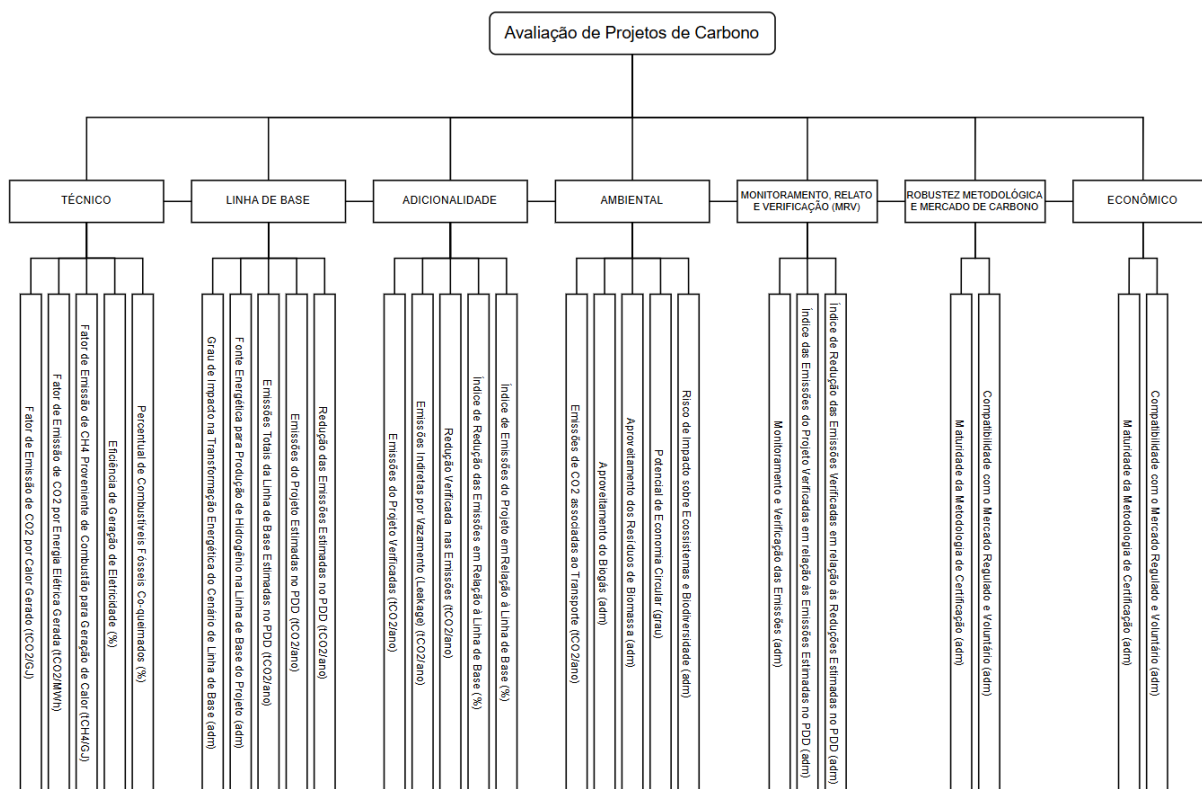
são atribuídos valores reais aos descritores do modelo para a avaliação de cinco projetos de crédito de carbono relacionados a diferentes fontes renováveis de energia: biomassa, biogás, energia eólica, energia solar fotovoltaica e hidrogênio verde. Essas alternativas são então analisadas por meio do modelo multicriterial proposto, possibilitando a comparação integrada de seus desempenhos sob as diferentes perspectivas de avaliação consideradas.

4.1 Árvore de Decisão

Uma árvore de decisão é definida como uma estrutura de modelo multicritério disposta em níveis hierárquicos, em que o nível hierárquico superior é definido completamente pelo conjunto de critérios do nível hierárquico inferior que estão conectados a ele. Dessa forma, tem-se que um critério mais complexo é decomposto em subcritérios de mais fácil mensuração (Ensslin; Neto; Noronha, 2001).

O modelo (Figura 7) é composto por sete PVFs, que representam os principais aspectos considerados relevantes para o objetivo de avaliação global dos projetos de crédito de carbono por fontes renováveis. Os Pontos de Vista Fundamentais (PVFs) são: Técnico; Linha de Base; Adicionalidade; Ambiental; Monitoramento, Relato, Verificação (MRV); Robustez Metodológica e Mercado de Carbono; e Econômico. Cada um desses PVFs é definido por descritores construídos e que definem o nível hierárquico inferior.

Figura 7 – Árvore de Pontos de Vista Fundamentais



Fonte: Elaboração Própria (2026).

4.2 Pontos de Vista Fundamentais (PVFs) e seus Descritores

Segundo Ensslin, Neto e Noronha (2001) organizar um modelo multicritério em PVFs e descritores permite realizar avaliações locais de cada descritor de forma independente, mas também permite realizar uma avaliação global de cada descritor ponderada por sua função de valor e pelos *trade-offs*. Conforme Bana e Costa (1992) e Ensslin, Neto e Noronha (2001) cada Ponto de Vista Fundamental agrupa em seu nível hierárquico inferior, os descritores com as características que definem esse PVF, considerando valores e interesses que o grupo de decisores considera importante.

Os descritores podem ser classificados de acordo com três tipos de classificações: quantitativo ou qualitativo; contínuo ou discreto; e ainda direto, indireto ou construído. Um descritor quantitativo é aquele que consegue descrever adequadamente o ponto de vista, utilizando somente números, enquanto um descritor qualitativo necessita de expressões semânticas para descrevê-lo. Um descritor é classificado como contínuo quando a função matemática que o constitui é

contínua, enquanto um descritor discreto é formado por níveis de impacto finitos. Por fim, um descritor direto é aquele que possui uma forma de medida numérica intrínseca, já um descritor é classificado como construído quando o seu ponto de vista é complexo e necessita da construção de um descritor específico, constituído por pontos de vista elementares. E, um descritor indireto é quando são associados a ele um evento ou propriedade dependente ao ponto de vista (Ensslin; Neto; Noronha, 2001).

Foram construídos 27 descritores para definir os sete Pontos de Vista Fundamentais (PVFs). Na Figura 8 é apresentado um resumo com o intuito de fornecer uma visão geral dos indicadores com uma breve descrição e a forma de cálculo ou obtenção de cada descritor.

Figura 8 – Resumo dos Descritores

PVF	#	CRITÉRIO	DESCRIÇÃO	COMO É CALCULADO/OBTIDO
TÉCNICO	1	Fator de Emissão de CO ₂ por Calor Gerado (tCO ₂ /GJ)	Representa quantas ton de CO ₂ são emitidas para gerar 1GJ de calor em média ao ano. Considera apenas a energia térmica (calor), excluindo energia elétrica.	Através do monitoramento das emissões, calculadas e reportadas pelo desenvolvedor do projeto nos documentos de verificação
	2	Fator de Emissão de CO ₂ por Energia Elétrica Gerada (tCO ₂ /MWh)	Representa quantas ton de CO ₂ são emitidas para gerar 1 MWh de energia elétrica no período de um ano. Considera apenas a energia elétrica, excluindo calor da cogeração.	Através do monitoramento das emissões, calculadas e reportadas pelo desenvolvedor do projeto nos documentos de verificação
	3	Fator de Emissão de CH ₄ Proveniente de Combustão para Geração de Calor (tCH ₄ /GJ)	Representa quantas toneladas de gás metano (CH ₄) são emitidas na geração de 1 GJ de calor.	Através do monitoramento das emissões, calculadas e reportadas pelo desenvolvedor do projeto nos documentos de verificação
	4	Eficiência de Geração de Eletricidade (%)	O indicador considera a capacidade de cada projeto em converter o recurso energético em energia elétrica útil.	O projeto apresenta o percentual de eficiência elétrica nos documentos de verificação e monitoramento
	5	Percentual de Combustíveis Fósseis Co-queimados (%)	É o percentual de combustíveis fósseis que são co-queimados junto à principal fonte energética do projeto.	O projeto apresenta o percentual de combustíveis fósseis co-queimados nos documentos de verificação e monitoramento
LINHA DE BASE	6	Grau de Impacto na Transformação Energética do Cenário de Linha de Base (adm)	Critério qualitativo que avalia a transformação que o projeto promove em relação ao cenário de linha de base.	-
	7	Fonte Energética para Produção de Hidrogênio na Linha de Base do Projeto (adm)	Critério qualitativo que avalia a transformação que um projeto de hidrogênio por eletrólise da água promove em relação ao cenário de linha de base.	-
	8	Emissões Totais da Linha de Base Estimadas no PDD (tCO ₂ /ano)	É a variável " ELB " na fórmula ao lado. São as emissões do cenário de linha de base que são prospectadas à ex-ante e apresentadas no PDD do projeto. São as emissões estimadas que ocorreriam na ausência da implementação do projeto (baseline).	$RE_{Prosp} = ELB - EP_{Prosp} - EL_{Prosp}$
	9	Emissões do Projeto Estimadas no PDD (tCO ₂ /ano)	É a variável " EPprosp " na fórmula ao lado. São as emissões estimadas à ex-ante que ocorram com a implementação do projeto.	LEGENDA: RE_{Prosp} = Redução das Emissões Prospectadas (estimadas) à ex-ante no PDD do projeto; ELB = Emissões da Linha de Base Prospectadas (estimadas) à ex-ante no PDD do projeto; EP_{Prosp} = Emissões do Projeto Prospectadas (estimadas) à ex-ante no PDD; EL_{Prosp} = Emissões por Vazamento (leakage) prospectadas;
	10	Redução das Emissões Estimadas no PDD (tCO ₂ /ano)	É a variável " REprosp " na fórmula ao lado. É a redução nas emissões que estima-se que o projeto ocasionará em relação ao cenário de linha de base.	
ADICIONALIDADE	11	Emissões do Projeto Verificadas (tCO ₂ /ano)	É a variável " EPverif " na fórmula ao lado. São as emissões do projeto que de fato ocorreram. São emissões verificadas por meio do monitoramento das emissões. Importante para a comprovação da adicionalidade do projeto	$RE_{Verif} = ELB - EP_{Verif} - EL_{Verif}$
	12	Emissões Indiretas por Vazamento (Leakage) (tCO ₂ /ano)	É a variável " ELverif " na fórmula ao lado. São emissões que ocorreram indiretamente por vazamento (leakage) e que foram verificadas.	LEGENDA: RE_{Verif} = Redução das Emissões Verificadas (monitoradas) do projeto; ELB = Emissões da Linha de Base Prospectadas (estimadas) à ex-ante no PDD do projeto; EP_{Verif} = Emissões do Projeto Verificadas (monitoradas); EL_{Verif} = Emissões por Vazamento (leakage) verificadas (monitoradas);
	13	Redução Verificada nas Emissões (tCO ₂ /ano)	É a variável " REverif " na fórmula ao lado. É a redução nas emissões que a implementação do projeto proporcionou em relação ao cenário de linha de base. Essa redução foi verificada por meio do monitoramento das emissões.	
	14	Índice de Redução das Emissões em Relação à Linha de Base (%)	É a razão entre a redução verificada das emissões do projeto " REverif " e as emissões que ocorreriam na linha de base " ELB ". O índice permite avaliar o quanto o projeto possibilitou reduzir as emissões em relação ao cenário de <i>baseline</i> , em termos percentuais (%).	$\frac{RE_{Verif}}{ELB_{Prosp}} (\%)$ LEGENDA: RE_{Verif} = Redução das Emissões Verificadas (monitoradas) do projeto; ELB_{Prosp} = Emissões da Linha de Base Prospectadas (estimadas) à ex-ante no PDD do projeto;
	15	Índice de Emissões do Projeto em Relação à Linha de Base (%)	É a razão entre as emissões verificadas do projeto " EPverif " e as emissões que ocorreriam na linha de base " ELB ". O índice permite avaliar o quanto o projeto emitiu a menos que o cenário de <i>baseline</i> , em termos percentuais (%).	$\frac{EP_{Verif}}{ELB_{Prosp}} (\%)$ LEGENDA: EP_{Verif} = Emissões do Projeto Verificadas (monitoradas); ELB_{Prosp} = Emissões da Linha de Base Prospectadas (estimadas) à ex-ante no PDD do projeto;

AMBIENTAL	16	Emissões de CO ₂ associadas ao Transporte (tCO ₂ /ano)	São as emissões ocorridas relacionadas ao transporte dos insumos necessários para a operação do projeto. Essas emissões devem ser contabilizadas quando o transporte é realizado por veículos movidos a combustíveis fósseis.	A ferramenta TOOL 12 possibilita calcular as emissões associadas ao transporte com base na distância percorrida, na quantidade de material transportado e outros fatores.
	17	Aproveitamento do Biogás (adm)	Critério qualitativo que avalia o aproveitamento da utilização do biogás gerado a partir de diferentes fontes orgânicas. O critério considera a captura do biogás e o seu uso energético/queima.	-
	18	Aproveitamento dos Resíduos de Biomassa (adm)	Critério qualitativo que avalia o aproveitamento dos resíduos de biomassa para fins energéticos ou o seu descarte resultando em maiores impactos ambientais	-
	19	Potencial de Economia Circular (grau)	O indicador avalia a capacidade do projeto no reaproveitamento de subprodutos, resíduo ou energia residual dentro do sistema produtivo. Os resíduos que seriam desperdiçados passam a ser reinseridos como insumos em novos processos produtivos ou energéticos	-
	20	Risco de Impacto sobre Ecossistemas e Biodiversidade (adm)	Critério qualitativo que avalia o o potencial do projeto em causar impactos negativos sobre o ecossistema e sobre a biodiversidade, decorrentes da implantação, operação e infraestrutura dos projetos.	-
MONITORAMENTO, RELATO, VERIFICAÇÃO (MRV)	21	Monitoramento e Verificação das Emissões (adm)	Critério qualitativo que estabelece níveis de impacto baseados no nível tecnológico dos sistemas de monitoramento e de verificação das emissões.	-
	22	Índice das Emissões do Projeto Verificadas em relação às Emissões Estimadas no PDD (adm)	É a razão entre as emissões do projeto verificadas "EP _{verif} " e as emissões do projeto prospectadas à ex-ante "EP _{prosp} ". O indicador mensura se as emissões verificadas do projeto atingirem as expectativas das emissões prospectadas feitas à ex-ante.	$\frac{EP_{verif}}{EP_{prosp}} (\%)$ LEGENDA: EP_{verif} = Emissões do Projeto Verificadas (monitoradas); EP_{prosp} = Emissões do Projeto Prospectadas (estimadas) à ex-ante no PDD;
	23	Índice de Redução das Emissões Verificadas em relação às Reduções Estimadas no PDD (adm)	É a razão entre a redução verificada das emissões do projeto "EP _{verif} " e a redução prospectada das emissões do projeto feitas à ex-ante "RE _{prosp} ". O indicador mensura se as reduções verificadas do projeto atingiram as expectativas das reduções prospectadas.	$\frac{RE_{verif}}{RE_{prosp}} (\%)$ LEGENDA: RE_{verif} = Redução das Emissões Verificadas (monitoradas) do projeto; RE_{prosp} = Redução das Emissões Prospectadas (estimadas) à ex-ante no PDD;
ROBUSTEZ METODOLÓGICA E MERCADO DE CARBONO	24	Maturidade da Metodologia de Certificação (adm)	Critério qualitativo que avalia o grau de consolidação e robustez da metodologia de certificação de crédito de carbono de cada projeto.	-
	25	Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário (adm)	Critério qualitativo que avalia o grau de compatibilidade do projeto e de sua metodologia vigente ao mercado regulado e também a compatibilidade com os padrões de certificação e comercialização de créditos de carbono do mercado voluntário.	-
ECONÔMICO	26	Taxa de Retorno Econômico dos Créditos de Carbono (adm)	O indicador avalia o potencial de retorno financeiro com a comercialização dos créditos de carbono frente ao investimento com a implementação do projeto. O indicador é crucial para a viabilidade econômica do projeto.	Razão entre a receita esperada da venda dos créditos de carbono e o investimento total necessário para implementação do projeto
	27	Taxa Interna de Retorno (TIR) do Projeto (%)	O indicador avalia a atratividade econômica do projeto por meio da Taxa Interna de Retorno (TIR) calculada pelos responsáveis do projeto e apresentadas no PDD	-

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Antes da apresentação individual dos descritores, é importante destacar que alguns indicadores pertencentes aos PVFs Linha de Base e Adicionalidade podem parecer semelhantes à primeira vista, uma vez que ambos envolvem a quantificação de emissões. Entretanto, há uma diferença crucial entre eles. Os indicadores associados ao PVF Linha de Base são baseados em emissões estimadas antes da implementação do projeto (análise *ex-ante*), enquanto os indicadores do PVF Adicionalidade estão relacionados às emissões efetivamente monitoradas e verificadas após a implementação do projeto (análise *ex-post*).

Essa distinção é importante, pois todo e qualquer projeto de crédito de carbono para gerar os Certificados de Emissões Reduzidas (CERs), seja no mercado regulado ou voluntário, precisa comprovar adicionalidade com a implementação do projeto, comprovando que as novas emissões ao implementar o projeto são inferiores às emissões do cenário de referência (cenário de linha de base). Assim, a diferença entre as emissões da linha de base e as emissões efetivamente verificadas após a implementação do projeto corresponde à redução real de emissões.

As metodologias de projetos de carbono do mercado regulado e do mercado voluntário utilizam as mesmas equações padrão para o cálculo das reduções de emissões. Essas equações são válidas para qualquer projeto de carbono relacionado a qualquer metodologia. Uma equação considera as emissões estimadas anteriormente à implementação do projeto, enquanto a outra considera as emissões que de fato ocorreram com a implementação do projeto, sendo explicitadas a seguir (Shrestha *et al.*, 2005, p. 90).

A Equação (18) apresentada em Shrestha *et al.* (2005, p. 90) considera as emissões estimadas à *ex-ante* do projeto, em que a redução estimada de emissões com a implementação do projeto é calculada pela subtração das emissões da linha de base (cenário de referência) pelas emissões estimadas que o projeto terá e pelas emissões estimadas que ocorram por vazamento (*leakage*). Este é o cálculo de projeções esperadas de emissões e devem estar documentadas no Documento de Concepção do Projeto, o PDD (*Project Design Document*). As variáveis dessa equação são consideradas nos descritores do PVF Linha de Base.

$$RE_{Prosp} = ELB - EP_{Prosp} - EL_{Prosp} \quad (18)$$

Em que, RE_{Prosp} é a redução de emissões estimadas (prospectadas) do projeto à *ex-ante* [tCO₂/ano]; ELB são as emissões da Linha de Base (cenário de referência) estimadas à *ex-ante* [tCO₂/ano]; EP_{Prosp} são as emissões estimadas (prospectadas) do projeto [tCO₂/ano]; e EL_{Prosp} são as emissões estimadas (prospectadas) por vazamento (*leakage*) [tCO₂/ano].

Por outro lado, a Equação (19) considera as emissões que foram monitoradas e verificadas após a implementação do projeto, em que a redução verificada de emissões com a implementação do projeto é calculada pela subtração das emissões da linha de base (cenário de referência) pelas emissões verificadas do projeto e pelas emissões verificadas por vazamento (*leakage*).

$$RE_{Verif} = ELB - EP_{Verif} - EL_{Verif} \quad (19)$$

Em que, RE_{Verif} é a redução de emissões verificadas e monitoradas do projeto [tCO₂/ano]; ELB são as emissões da Linha de Base (cenário de referência) estimadas à *ex-ante* [tCO₂/ano]; EP_{Verif} são as emissões verificadas e monitoradas

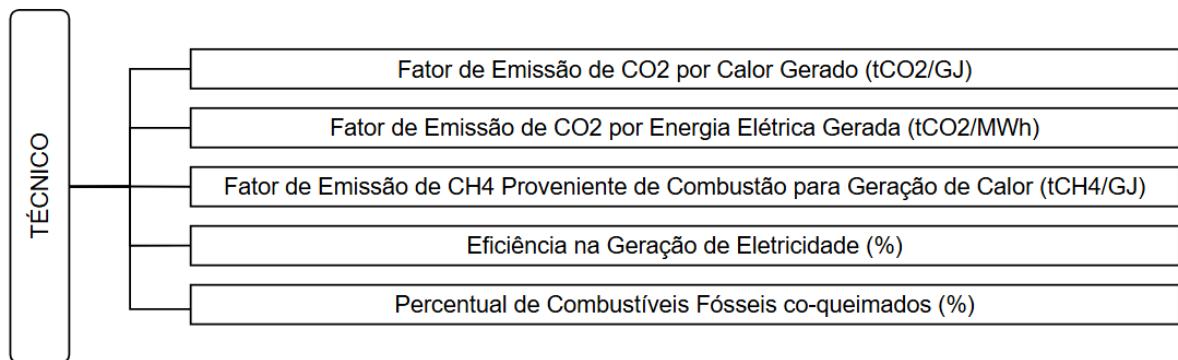
do projeto [tCO_2/ano]; e EL_{verif} são as emissões verificadas e monitoradas por vazamento (*leakage*) [tCO_2/ano].

Nas seções seguintes são definidos cada um dos Pontos de Vista Fundamentais e construídos os seus respectivos descritores, a fim de estruturar o modelo multicriterial de apoio à decisão para aplicação no estudo de caso.

4.2.1 Ponto de Vista Fundamental: Técnico

O PVF Técnico (Figura 9) avalia o desempenho operacional e tecnológico dos projetos de carbono, considerando aspectos relacionados à eficiência energética, às emissões associadas ao processo de geração de energia e ao grau de dependência de combustíveis fósseis. A inclusão desse PVF no modelo multicriterial, justifica-se em virtude da capacidade de um projeto em gerar energia de forma eficiente e com menores emissões está diretamente relacionada ao seu potencial de contribuir para a mitigação das emissões.

Figura 9 – Indicadores do PVF Técnico



Fonte: Elaboração Própria (2026).

4.2.1.1 Fator de Emissão de CO_2 por Calor Gerado

O indicador representa a quantidade de toneladas de CO_2 que são emitidas para cada GJ de energia térmica gerada no período de um ano. O indicador considera exclusivamente a energia em forma de calor que é produzida pelos projetos analisados no estudo de caso, assim a energia em forma de eletricidade não é considerada nesse indicador. O indicador é especialmente importante para os

projetos de biomassa e biogás, pois são processos em que pode haver a cogeração de calor e energia elétrica.

Uma forma de determinar o “fator de emissão de CO₂ por calor gerado” é através do monitoramento constante das emissões e da energia térmica gerada com a implementação do projeto, durante o período de um ano, sendo calculado pela razão entre eles. Caso seja difícil a determinação do indicador através do monitoramento, as metodologias de carbono da UNFCCC (2026,b) permitem utilizar valores tabelados presentes no relatório do IPCC denominado de Inventário de Diretrizes para Gases de Efeito Estufa (*IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*). As metodologias indicam utilizar como referência os valores de emissão para o pior caso (*upper values*) presentes na Tabela 1.4 do relatório do IPCC (IPCC, 2006).

Os valores tabelados no relatório do IPCC contemplam as principais fontes energéticas para combustão, apresentando um fator de emissão de 0,117 tCO₂/GJ para biomassa, 0,0843 tCO₂/GJ para biodiesel, 0,066 tCO₂/GJ para biogás e 0,0953 tCO₂/GJ para outros biocombustíveis líquidos (IPCC, 2006). O indicador é classificado como quantitativo, direto, contínuo e com unidade em tCO₂/GJ, sendo também classificado como decrescente, uma vez que menores fatores de emissão indicam um melhor desempenho.

4.2.1.2 Fator de Emissão de CO₂ por Energia Elétrica Gerada

O indicador representa a quantidade de toneladas de CO₂ que são emitidas para cada MWh de energia elétrica gerada no período de um ano. O indicador considera somente a energia em forma de eletricidade, excluindo outras formas de energia. O cálculo do indicador é realizado pelo próprio desenvolvedor do projeto por meio do monitoramento constante das emissões e da energia elétrica gerada com a implementação do projeto. O valor calculado deve ser exposto no PDD (*Project Design Document*) do projeto e nos relatórios de monitoramento e verificação apresentados durante o período de vigência do projeto.

O anexo 3 do quinto relatório de avaliação do IPCC (*AR5 - Fifth Assessment Report*) apresenta valores médios para o fator de emissão das

principais fontes de energia ao longo de toda a sua vida útil, em que a biomassa dedicada à produção de eletricidade apresenta valor de emissão de 230 gCO₂/kWh, solar fotovoltaico de 41 gCO₂/kWh e eólicoelétrica *on-shore* com cerca de 11 gCO₂/kWh (IPCC, 2018, p.7). O estudo de Sobczuk *et al.* (2025) corrobora com os dados do IPCC, ao afirmar que usinas fotovoltaicas e eólicoelétricas têm emissões operacionais praticamente nulas, porém ao considerar todo o ciclo de vida desses sistemas desde a extração, produção, operação, até o descarte das matérias-primas, um sistema fotovoltaico pode emitir entre 28 a 100 gCO₂/kWh, enquanto um sistema eólicoelétrico entre 7 a 38 gCO₂/kWh.

Entretanto, os projetos de geração por energia eólica e solar considerados no estudo de caso contabilizam apenas as emissões operacionais do projeto, e dessa forma, apresentam emissões nulas de CO₂ por MWh de energia elétrica gerada. Os valores apresentados servem apenas como uma referência, uma vez que, no estudo de caso serão aplicados os valores calculados para cada projeto pelos próprios desenvolvedores. Deste modo, o indicador é classificado como quantitativo, direto, contínuo e com unidade em tCO₂/MWh, sendo classificado como decrescente, uma vez que menores fatores de emissão indicam um melhor desempenho.

4.2.1.3 Fator de Emissão de CH₄ Proveniente de Combustão para Geração de Calor

O indicador representa a quantidade de toneladas de gás metano (CH₄) que são emitidas para cada GJ produzidos em média ao ano. O fator de emissão do projeto deve ser calculado através dos dados monitorados das emissões e da energia térmica produzida com a implementação do projeto. A Tabela 3 da metodologia ACM0006 (Geração de eletricidade e calor a partir de biomassa) da UNFCCC (2026b, p.36) fornece valores de referência para algumas fontes de biomassa e biogás, baseados nos valores padrão do relatório do IPCC (*Guidelines IPCC 2006*).

O menor fator de emissão presente no relatório é para a combustão do subproduto da produção de papel e celulose, a lixívia (licor negro), que apresenta 0,000003 tCH₄/GJ. O maior valor de emissão é proveniente da combustão de resíduos de madeira e de outros resíduos sólidos de biomassa, que emitem cerca de

0,00003 tCH₄/GJ (UNFCCC, 2026b, p.36). A metodologia indica multiplicar os valores por um fator conservador de 1,37 para reduzir o grau de incerteza. Dessa forma, o fator de emissão da lixívia será de 0,00000411 tCH₄/GJ e para resíduos de madeira de 0,0000411 tCH₄/GJ.

Os projetos do estudo de caso de energia renovável como solar, eólica e hidrogênio verde apresentam emissões nulas de gás metano (CH₄) em suas operações. Os valores apresentados acima servem apenas como uma referência, uma vez que, no estudo de caso serão aplicados os valores calculados para cada projeto pelos próprios desenvolvedores e são apresentados na seção “Matriz de Consequência”. Deste modo, o indicador é classificado como quantitativo, direto, contínuo e com unidade em tCH₄/GJ, sendo também classificado como decrescente, uma vez que menores fatores de emissão indicam um melhor desempenho do indicador.

4.2.1.4 Eficiência na Geração de Eletricidade

O indicador considera a capacidade de cada projeto em converter o recurso energético em energia elétrica útil. Mensura o grau de aproveitamento energético do insumo primário utilizado para a geração de eletricidade. Para projetos de biomassa, por exemplo, o indicador reflete a quantidade de energia elétrica produzida a partir da conversão da matéria orgânica disponível. Já, em projetos fotovoltaicos, representa a eficiência de conversão da radiação solar incidente em eletricidade pelos módulos solares.

O indicador foi obtido do anexo das metodologias da UNFCCC, chamado de “TOOL 9” (Ferramenta da UNFCCC para determinar a eficiência em sistemas de geração elétrica da linha de base). O anexo “TOOL 9” apresenta os valores padrão de eficiência elétrica da biomassa, que utiliza como fonte dados do IEA (*International Energy Agency*) (UNFCCC, 2026b, p.13). Para geração de eletricidade por biomassa à ciclo combinado de gaseificação (BIGCC - *Biomass Integrated Gasification Combined Cycle*) apresenta uma eficiência elétrica de 42%, enquanto outras formas de geração de energia elétrica por biomassa apresentam eficiência padrão de 35%. Desse modo, o indicador é classificado como quantitativo, direto, contínuo e com

unidade em %, sendo também classificado como crescente, uma vez que um maior valor de eficiência indica um melhor desempenho do indicador.

4.2.1.5 Percentual de Combustíveis Fósseis Co-queimados

O indicador representa a participação energética de combustíveis fósseis juntamente com a fonte principal de energia dos projetos de carbono. Algumas metodologias do mercado regulado e voluntário permitem que combustíveis fósseis sejam co-queimados com outros combustíveis, desde que não exceda um limite estipulado. Para a geração de eletricidade por biomassa, por exemplo, é imposto como limite que a quantidade de combustíveis fósseis co-queimados não exceda 80% do total de combustível queimado em termos energéticos, desde que comprovada adicionalidade com o projeto (UNFCCC, 2026b, p.5).

O percentual de combustíveis fósseis co-queimados deve estar disponível nos documentos de monitoramento e de verificação das emissões do projeto. Caso não seja apresentado de forma explícita, pode ser obtido indiretamente a partir das informações reportadas sobre a quantidade de combustíveis fósseis consumidos e o consumo total de combustíveis do sistema.

Para os projetos de carbono do estudo de caso em que não há combustão de nenhum tipo de combustível, o percentual de combustíveis fósseis co-queimados é de 0%. O indicador é classificado como quantitativo, direto, contínuo e com unidade em %, sendo também classificado como decrescente, uma vez que menores percentuais de combustíveis fósseis co-queimados indicam um melhor desempenho ambiental do projeto.

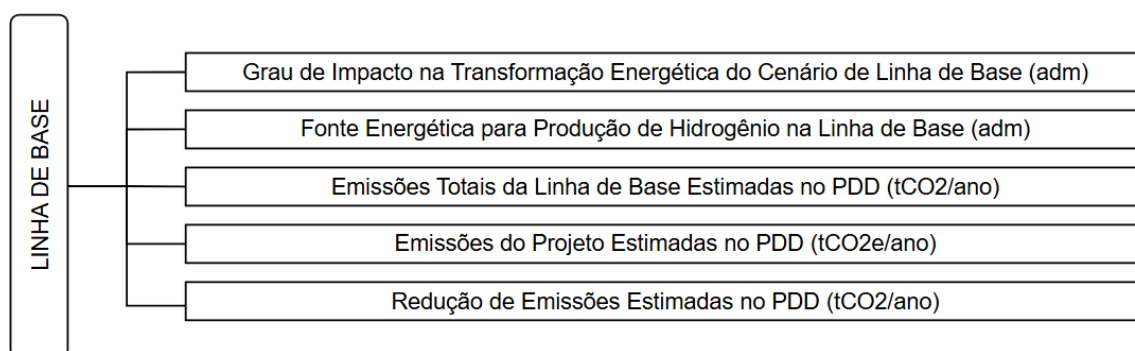
4.2.2 Ponto de Vista Fundamental: Linha de Base

O PVF Linha de Base avalia as características do cenário de referência dos projetos de carbono e o potencial de redução de emissões associado à sua implementação. Os indicadores que compõem este PVF contemplam aspectos relacionados à transformação energética promovida pelo projeto, às fontes energéticas substituídas e às emissões estimadas antes de sua implementação.

A construção desse PVF no modelo multicriterial, justifica-se pela importância crucial da determinação da linha de base (cenário de referência) e na quantificação das emissões estimadas. Como as reduções de emissões são determinadas a partir da comparação entre o cenário de referência e o cenário com a implementação do projeto, a correta caracterização da linha de base é fundamental para estimar o potencial de mitigação das emissões e posterior geração de créditos de carbono.

A Figura 10 apresenta a decomposição do PVF Linha de Base em seus respectivos descritores. Em seguida, cada descritor é definido e analisado individualmente, destacando sua relevância para a avaliação dos projetos de carbono.

Figura 10 – Indicadores do PVF Linha de Base



Fonte: Elaboração Própria (2026).

4.2.2.1 *Grau de Impacto na Transformação Energética do Cenário de Linha de Base*

O indicador avalia o nível de transformação promovido pelo projeto em relação ao cenário de linha de base, considerando alguns fatores como: a substituição das fontes emissoras, melhorias de eficiência energética, implantação de novas tecnologias e expansão de capacidade de geração de baixo carbono.

O indicador é construído com base nos possíveis cenários de aplicabilidade de projetos de carbono. Algumas metodologias do mercado regulado e voluntário descrevem os possíveis cenários de melhoria em relação à linha de base, para projetos que utilizam fontes energéticas renováveis ou de baixo carbono. Deste modo, o critério é classificado como qualitativo, discreto, construído e com unidade adimensional. Por se tratar de um critério qualitativo, ele é descrito e

construído em níveis de impacto, que representam cenários diferentes de desempenho associados aos projetos, sendo o nível de impacto N_1 o melhor possível (a^*) e N_5 o pior aceitável (a_*):

- **N_1** – Substituição total ou praticamente total dos combustíveis fósseis utilizados nas usinas de energia existentes por fontes renováveis ou de baixo carbono, reduzindo as emissões em comparação com a linha de base;
- **N_2** – Substituição parcial dos combustíveis fósseis utilizados nas usinas de energia existentes por fontes renováveis ou de baixo carbono, reduzindo as emissões em comparação com a linha de base;
- **N_3** – Melhoria de eficiência energética das centrais elétricas, por meio de modernização tecnológica ou otimização operacional na planta já existente;
- **N_4** – Projeto de instalação de uma planta de fonte renovável ou de baixo carbono, onde anteriormente não havia qualquer geração de energia e/ou calor (Greenfield Projects); e
- **N_5** – Projeto de expansão de capacidade de geração de energia elétrica de uma planta já existente.

4.2.2.2 *Fonte Energética para Produção de Hidrogênio na Linha de Base do Projeto*

O indicador avalia a transformação que um projeto de hidrogênio por eletrólise da água promove em relação ao cenário de linha de base. Avalia em níveis de impacto a produção de H_2 proveniente de diferentes resíduos na linha de base, como o vapor de gás natural, vapor da gaseificação do carvão, vapor da gaseificação do petróleo e gaseificação de biomassa. O indicador é baseado na metodologia AM0124 (Produção de Hidrogênio a partir da Eletrólise da Água) que contempla projetos de carbono voltados para a produção de hidrogênio por eletrólise da água, por meio de eletricidade proveniente exclusivamente de uma usina de energia renovável própria (UNFCCC, 2026h, p.7).

O critério é classificado como qualitativo, discreto, construído e com unidade adimensional. Por se tratar de um critério qualitativo, ele é descrito e construído em níveis de impacto, em que o nível de impacto N_1 é o melhor possível (a^*) e N_5 o pior aceitável (a_*).

Os níveis de impacto foram estabelecidos com base no potencial de redução líquida de emissões proporcionadas pela substituição da tecnologia de produção de hidrogênio existente na linha de base pelo projeto de eletrólise da água alimentado por eletricidade renovável. Quanto maior a intensidade de emissões

associada à linha de base, maior tende a ser o benefício decorrente de sua substituição, resultando em um desempenho mais atrativo para o indicador. Nesse contexto, a produção de hidrogênio a partir da gaseificação do carvão foi classificada como o nível de impacto melhor possível N_1 , uma vez que sua substituição pela eletrólise renovável tende a proporcionar maiores reduções líquidas de emissões. Em contrapartida, a gaseificação da biomassa foi estabelecida como o pior desempenho aceitável N_5 , devido ao menor diferencial de emissões em relação ao projeto de eletrólise da água. Assim, tem-se:

- **N_1** – Produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do gás de síntese (syngas) produzido pela gaseificação do carvão, sem captura e armazenamento de CO_2 ;
- **N_2** – Produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do gás natural sem captura e armazenamento de CO_2 ;
- **N_3** – Produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do gás de síntese (syngas) produzido pela gaseificação do petróleo, sem captura e armazenamento de CO_2 ;
- **N_4** – Produção de hidrogênio a partir de matérias-primas químicas, como metanol, etanol, craqueamento de amônia líquida; e
- **N_5** – Produção de hidrogênio a partir da gaseificação da biomassa sem captura e armazenamento de CO_2 .

4.2.2.3 Emissões da Linha de Base Estimadas no PDD

O indicador representa as emissões do cenário de linha de base que são prospectadas (estimadas) à *ex-ante* e apresentadas no PDD (*Project Design Document*) do projeto, que ocorreriam na ausência da implementação do projeto, ou seja, é o cenário de referência (*baseline*). O indicador é calculado pela média aritmética das emissões anuais estimadas para o cenário de referência durante o período de creditação do projeto (*crediting period*).

$$E_{LB} = \frac{\sum E_{LB,n}}{n} \quad (20)$$

Em que, E_{LB} é a emissão média da Linha de Base (cenário de referência) [tCO₂/ano]; $E_{LB,n}$ é a emissão anual da linha de base ao longo de “n” anos [tCO₂]; e n é a quantidade de anos em que o projeto será creditado (*crediting period*).

O cálculo da emissão média da linha de base determina a variável “E_{LB}” na Equação (18) e na Equação (19) descritas. É importante que o desenvolvedor do projeto determine as emissões de linha de base corretamente, pois é um dado fundamental para verificar adicionalidade e realizar posteriormente a correta emissão dos créditos de carbono (CER’s).

Para o indicador considerou-se que maiores emissões na linha de base indicam um maior potencial de reduções de emissões com a implementação do projeto, sendo assim, emissões mais elevadas foram consideradas como melhores níveis de impacto, devido a maior potencial de mitigação. Importante ressaltar que nesse indicador são analisadas apenas as emissões estimadas anteriormente à implementação do projeto (*ex-ante*). As emissões que ocorreram após a implementação do projeto (*ex-post*), são chamadas de emissões verificadas/monitoradas e são analisadas em outros indicadores.

4.2.2.4 Emissões do Projeto Estimadas no PDD

O indicador representa as emissões estimadas que ocorrerão com a implementação do projeto de carbono, conhecidas como emissões do projeto (Project Emissions). Essas emissões correspondem às novas fontes de emissão que serão introduzidas pelo projeto, e que não estavam presentes no cenário de referência (linha de base). Tais emissões são estimadas (prospectadas) à *ex-ante* e são apresentadas no PDD. O indicador é calculado pela média aritmética das emissões anuais estimadas para o projeto durante o período de creditação do projeto (*crediting period*), conforme Equação (21).

$$EP_{Prosp} = \frac{\sum EP_n}{n} \quad (21)$$

Em que, EP_{Prosp} é a emissão estimada média do projeto [tCO₂/ano]; EP_n é a emissão anual estimada para o projeto ao longo de “n” anos, em [tCO₂]; e n é a quantidade de anos em que o projeto será creditado (*crediting period*).

O cálculo da emissão média estimada do projeto determina a variável “E_{Prosp}” na Equação (18). Ressalta-se que nesse indicador são analisadas apenas as emissões estimadas para o projeto anteriormente à sua implementação (*ex-ante*). As

emissões do projeto que ocorreram após a implementação (*ex-post*), são chamadas de emissões verificadas/monitoradas e são analisadas em outros indicadores. Esse indicador é classificado como quantitativo, direto, contínuo e com unidade em tCO₂/ano, sendo também classificado como decrescente, uma vez que menores valores de emissão indicam um melhor desempenho ambiental do projeto.

4.2.2.5 Redução das Emissões Estimadas no PDD

O indicador representa a redução nas emissões estimadas que o projeto de carbono proporcionará em relação ao seu cenário de linha de base (cenário de referência). O indicador é calculado pela média aritmética das reduções anuais estimadas para o projeto durante o período de creditação do projeto (*crediting period*), conforme Equação (22).

$$RE_{prosp} = \frac{\sum RE_n}{n} \quad (22)$$

Em que, RE_{prosp} é a redução de emissão estimada média do projeto [tCO₂/ano]; RE_n é a redução de emissão anual estimada para o projeto ao longo de “n” anos [tCO₂]; e n é a quantidade de anos em que o projeto será creditado (*crediting period*).

De acordo com as metodologias vigentes do mercado regulado e voluntário, as reduções de emissões são calculadas a partir da diferença entre as emissões do cenário de linha de base e as emissões associadas à implementação do projeto, e considerando também eventuais emissões indiretas por vazamento (*leakage*), conforme é visto na Equação (18). Esse indicador também considera apenas as reduções nas emissões estimadas (prospectadas) anteriormente à sua implementação (*ex-ante*). As emissões verificadas que ocorreram após a implementação (*ex-post*), vão ser analisadas em outros indicadores.

4.2.3 Ponto de Vista Fundamental: Adicionalidade

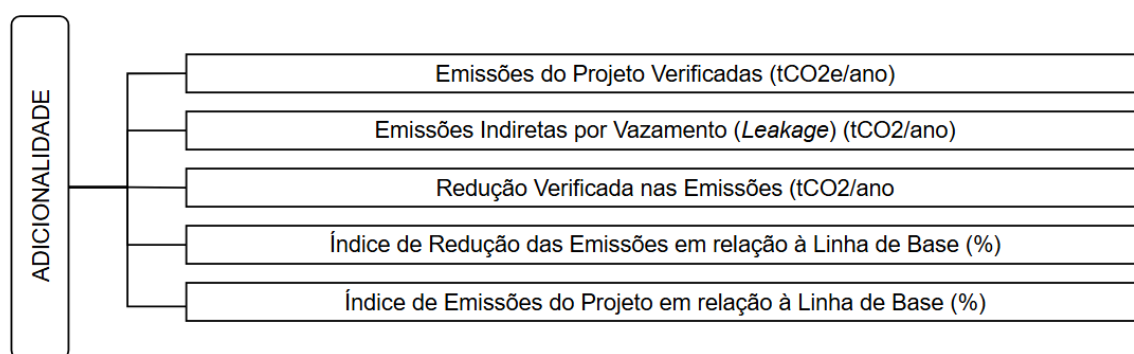
O PVF Adicionalidade avalia o desempenho efetivo dos projetos de carbono após sua implementação, com base em dados monitorados e verificados ao longo do período de creditação. Diferentemente do PVF Linha de Base, que representa um cenário de referência estimado antes da execução do projeto, este

PVF considera as emissões e reduções reais observadas (*ex-post*), permitindo verificar o impacto efetivamente alcançado.

Os indicadores que compõem este PVF estão relacionados às emissões verificadas do projeto, às emissões indiretas por vazamento (*leakage*) e às reduções efetivamente comprovadas em relação ao cenário de referência. Além disso, são incluídos índices percentuais que permitem comparar o desempenho do projeto com a linha de base, evidenciando sua capacidade real de mitigação de emissões.

A Figura 11 apresenta a decomposição do PVF Adicionalidade em seus respectivos descritores. Em seguida, cada descritor é definido e analisado individualmente, destacando sua importância na comprovação da efetividade ambiental dos projetos de carbono.

Figura 11 – Indicadores do PVF Adicionalidade



Fonte: Elaboração Própria (2026).

4.2.3.1 Emissões do Projeto Verificadas

O indicador representa as emissões do projeto que foram efetivamente monitoradas e verificadas durante o período de creditação, ou seja, as emissões que de fato aconteceram com a implementação do projeto de carbono. Estas se diferem do indicador anteriormente apresentado “Emissões do Projeto Estimadas no PDD (tCO₂/ano)” em que as emissões eram estimativas projetadas à *ex-ante* com base em cálculos do PDD, enquanto que o presente indicador trata das emissões que realmente aconteceram (*ex-post*), resultantes da operação real do projeto e que foram verificadas e monitoradas ao longo do período de vigência do projeto.

As emissões monitoradas e verificadas são encontradas nos relatórios de monitoramento (*monitoring reports*) e nos relatórios de verificação (*verification reports*) de cada projeto de crédito de carbono. Ressalta-se que cada relatório de monitoramento é normalmente apresentado anualmente ou bianualmente, então para que haja uma correta verificação para todo o período de creditação deve-se calcular a média ao longo de todos os anos de monitoramento. Dessa forma, o indicador é calculado de acordo com a Equação (23), que calcula a média aritmética das emissões do projeto monitoradas e verificadas que foram reportadas ao longo dos anos.

$$EP_{Verif} = \frac{\sum EP_n}{n} \quad (23)$$

Em que, EP_{Verif} é a emissão média verificada e monitorada do projeto [tCO₂/ano]; EP_n é emissão anual verificada para o projeto ao longo de “n” anos de creditação [tCO₂]; e n é a quantidade de anos em que o projeto foi creditado (*crediting period*).

O cálculo da emissão média verificada do projeto determina a variável “ EP_{Verif} ” na Equação (19). O indicador aborda as emissões verificadas que ocorreram após a implementação do projeto (*ex-post*). O indicador é classificado como quantitativo, direto, contínuo e com unidade em tCO₂/ano, sendo também classificado como decrescente, uma vez que menores valores de emissão indicam um melhor desempenho do projeto.

4.2.3.2 Emissões Indiretas por Vazamento (*Leakage*)

O indicador representa exclusivamente as emissões que ocorrem de forma indireta por vazamento (*Leakage*), que surgem com a implementação do projeto de carbono. As emissões por *leakage* são emissões importantes que ocorrem fora dos limites do projeto, mas que são causadas por ele, ou seja, mesmo que o projeto reduza emissões localmente, pode estar causando indiretamente emissões em outro lugar.

Diversos documentos auxiliares, denominados de “TOOLS” estão presentes nas metodologias da UNFCCC e Verra como forma de auxiliar no cálculo das emissões indiretas por *leakage*. Os documentos “TOOL 5”, “TOOL 12” e “TOOL

16” são alguns exemplos de documentos que indicam como estimar e calcular as emissões desse tipo (UNFCCC, 2026b). Não são estabelecidos limites máximos ou valores de referência nas metodologias para as emissões por *leakage*, mas emissões desse tipo devem ser as menores possíveis para não comprometer a viabilidade do projeto.

As emissões por *leakage*, embora difíceis de contabilizar, interferem nas emissões de créditos de carbono (CERs) do projeto, uma vez que, no cálculo da redução das emissões, as emissões por *leakage* são subtraídas da linha de base.

O cálculo das emissões verificadas por vazamento (*leakage*) determinam a variável “EL_{verif}” na Equação (19) e devem ser apresentadas nos relatórios de monitoramento do projeto. O indicador aborda as emissões verificados por *leakage* que ocorreram após a implementação do projeto (*ex-post*). O indicador é classificado como quantitativo, direto, contínuo e com unidade em tCO₂/ano, sendo também classificado como decrescente, uma vez que menores valores de emissão indicam um melhor desempenho do projeto.

4.2.3.3 Redução Verificada nas Emissões

O indicador representa a redução das emissões que foram efetivamente monitoradas e verificadas durante o período de creditação, ou seja, a redução que de fato ocorreu com a implementação do projeto de carbono. Este indicador se difere do indicador “Redução das Emissões Estimadas no PDD (tCO₂/ano)” em que a redução das emissões eram estimativas projetadas à *ex-ante* com base em cálculos do PDD, enquanto que o presente indicador trata da redução nas emissões que realmente aconteceram (*ex-post*), resultantes da operação real do projeto e que foram verificadas e monitoradas ao longo do período de vigência do projeto.

A redução das emissões monitoradas e verificadas são encontradas nos relatórios de monitoramento (*monitoring reports*) e nos relatórios de verificação (*verification reports*) de cada projeto de crédito de carbono. Ressalta-se que cada relatório de monitoramento é normalmente apresentado anualmente ou bianualmente, então para uma correta verificação de todo o período de creditação deve-se calcular a média ao longo de todos os anos de monitoramento.

$$RE_{verif} = \frac{\sum RE_n}{n} \quad (24)$$

Em que, RE_{verif} é a redução de emissão verificada média do projeto [tCO₂/ano]; RE_n é a redução anual verificada para o projeto ao longo de “n” anos de creditação [tCO₂]; e n é a quantidade de anos em que o projeto foi creditado (*crediting period*).

O indicador aborda as reduções verificadas que ocorreram após a implementação do projeto (*ex-post*). O indicador é classificado como quantitativo, direto, contínuo e com unidade em tCO₂/ano, sendo também classificado como crescente, uma vez que maiores valores de redução indicam um melhor desempenho do projeto.

4.2.3.4 Índice de Redução das Emissões em Relação à Linha de Base

O indicador é definido como a razão entre a redução verificada das emissões do projeto (RE_{verif}) e as emissões estimadas da linha de base (E_{LB}), conforme a Equação (25). O índice permite avaliar o quanto o projeto possibilitou reduzir as emissões em relação ao cenário de referência (*baseline*), em termos percentuais. O índice expressa a efetividade do projeto em mitigar as emissões que seriam esperadas na ausência de sua implementação, assim quanto maior o valor, maior é a proporção das emissões da linha de base efetivamente evitadas pelo projeto. Um índice igual a 100% indica que as reduções verificadas de emissões foram equivalentes ao total das emissões estimadas para o cenário de linha de base, ou seja, o projeto evitou uma quantidade de emissões correspondente à totalidade das emissões que ocorreriam na ausência do projeto. Por outro lado, um índice de 0% indica que o projeto não apresentou reduções em relação ao cenário de referência.

$$IR_{LB} = \frac{RE_{verif}}{E_{LB}} \quad (25)$$

Em que, IR_{LB} é o índice de redução das emissões verificadas em relação à linha de base (cenário de referência) [%]; RE_{verif} é a redução de emissão verificada média do projeto [tCO₂/ano]; e E_{LB} é a emissão média da Linha de Base (cenário de referência) [tCO₂/ano].

O indicador é classificado como quantitativo, direto, contínuo e com unidade em %, sendo também classificado como crescente, uma vez que maiores valores percentuais indicam um melhor desempenho do projeto.

4.2.3.5 Índice de Emissões do Projeto em Relação à Linha de Base

O indicador é definido como a razão entre as emissões verificadas do projeto (EP_{Verif}) e as emissões estimadas da linha de base (E_{LB}), ou seja, mensura em termos percentuais, quanto o projeto efetivamente emitiu em relação ao cenário de referência. O indicador é classificado como quantitativo, direto, contínuo e com unidade em %.

Diferentemente do indicador anterior, este indicador apresenta um comportamento decrescente, pois quanto menor for a proporção entre as emissões verificadas do projeto e as emissões da linha de base, melhor o desempenho do projeto e maior foi a sua capacidade em evitar emissões. Um índice de 0% é o melhor possível, pois significa que o projeto não emitiu nada, enquanto um índice de 100% significa que o projeto emitiu o mesmo que o cenário de linha de base, não resultando em reduções líquidas de emissões e não comprovando adicionalidade.

$$IEP_{LB} = \frac{EP_{Verif}}{E_{LB}} \quad (26)$$

Em que, IEP_{LB} é o índice de emissões verificadas do projeto em relação à linha de base (cenário de referência) [%]; EP_{Verif} é a emissão média verificada e monitorada do projeto [tCO₂/ano]; e E_{LB} é a emissão média da Linha de Base (cenário de referência [tCO₂/ano]).

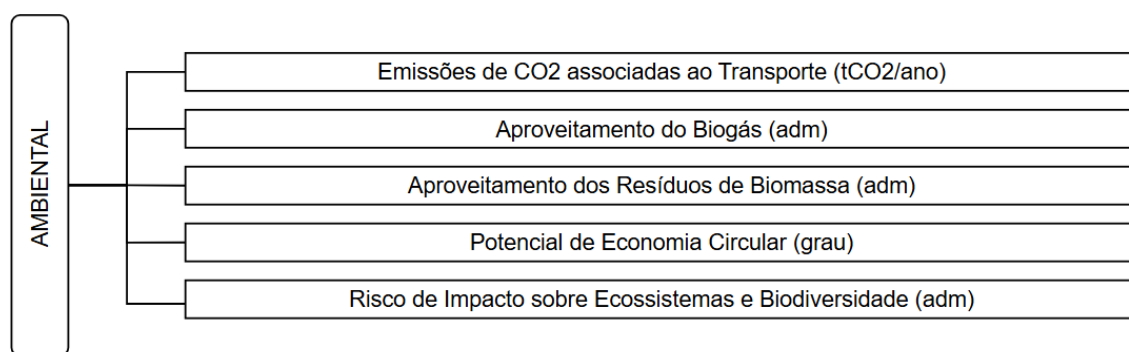
4.2.4 Ponto de Vista Fundamental: Ambiental

O PVF Ambiental avalia os impactos ambientais associados aos projetos de carbono considerando aspectos relacionados ao uso de recursos, aproveitamento de resíduos, economia circular e possíveis impactos sobre ecossistemas e biodiversidade. Os indicadores que compõem este PVF permitem analisar diferentes dimensões ambientais dos projetos, incluindo emissões associadas ao transporte de insumos, formas de aproveitamento de biogás e resíduos de biomassa, potencial de

economia circular e riscos de impacto ambiental sobre a biodiversidade. Em conjunto, esses critérios possibilitam uma avaliação mais abrangente dos efeitos ambientais dos projetos, considerando não apenas sua contribuição para a redução de emissões, mas também seus impactos indiretos sobre o meio ambiente.

A Figura 12 apresenta a decomposição do PVF Ambiental em seus respectivos descritores. Em seguida, cada descritor é definido e analisado individualmente, destacando suas características e sua relevância para a avaliação ambiental dos projetos de carbono.

Figura 12 – Indicadores do PVF Ambiental



Fonte: Elaboração Própria (2026).

4.2.4.1 Emissões de CO2 associadas ao Transporte

O indicador quantifica as emissões de dióxido de carbono decorrentes do transporte terrestre dos insumos necessários para a operação do projeto. Essas emissões são consideradas emissões do projeto e devem ser contabilizadas quando o transporte é realizado por veículos movidos a combustíveis fósseis.

A ferramenta TOOL 12 (Emissões do projeto provenientes do transporte de carga) indica como calcular as emissões associadas ao transporte e como podem ser estimadas com base na distância percorrida, na quantidade de material transportado e em fatores de emissão específicos para veículos leves ou pesados. O cálculo das emissões relacionadas ao transporte deve ser feita pelo desenvolvedor do projeto e apresentado nos relatórios de monitoramento e verificação do projeto. O indicador é classificado como quantitativo, direto, contínuo e com unidade em

tCO₂/ano, sendo também classificado como decrescente, uma vez que menores emissões indicam um melhor desempenho do projeto (UNFCCC, 2026b).

4.2.4.2 Aproveitamento do Biogás

O indicador avalia o aproveitamento na utilização do biogás gerado a partir de diferentes fontes orgânicas. O objetivo é verificar como o biogás capturado é efetivamente utilizado para substituir combustíveis fósseis ou gerar energia útil, evitando sua liberação direta na atmosfera ou sua simples queima.

O critério é classificado como qualitativo, discreto, construído e com unidade adimensional. Por se tratar de um critério qualitativo, ele é descrito e construído em níveis de impacto, que vão representar cenários diferentes de desempenho associados aos projetos, sendo o nível de impacto N₁ o melhor possível (a*) e N₅ o pior aceitável (a*):

- **N₁** – O biogás proveniente de resíduos de biomassa é capturado e utilizado para fins energéticos como geração de eletricidade e/ou energia térmica;
- **N₂** – O biogás proveniente de aterro sanitário é capturado e utilizado para fins energéticos como geração de eletricidade e/ou energia térmica;
- **N₃** – O biogás proveniente do tratamento de águas residuais é capturado e utilizado para fins energéticos como geração de eletricidade e/ou energia térmica;
- **N₄** – O biogás produzido independentemente da fonte é capturado e usado como matéria-prima ou como combustível para transporte; e
- **N₅** – O biogás produzido independentemente da fonte é capturado e queimado para evitar liberação direta de gás metano na atmosfera.

4.2.4.3 Aproveitamento dos Resíduos de Biomassa

O indicador avalia a forma de destinação e utilização dos resíduos de biomassa gerados no contexto do projeto. O indicador identifica como resíduos são aproveitados para fins energéticos ou como são descartados de maneira que resulte em perdas de potencial energético e em maiores impactos ambientais. O aproveitamento energético dos resíduos de biomassa contribui para a substituição de combustíveis fósseis e para a redução das emissões. Caso ocorra descarte inadequado ou queima livre desses resíduos resultam em emissões adicionais sem vantagens energéticas.

O critério é classificado como qualitativo, discreto, direto e com unidade adimensional. É um critério qualitativo, é descrito e construído em níveis de impacto, que representam cenários diferentes de desempenho associados aos projetos, sendo o nível de impacto N_1 o melhor possível (a^*) e N_4 o pior aceitável (a_*):

- **N_1** – Os resíduos de biomassa são utilizados para geração de calor e/ou eletricidade no projeto;
- **N_2** – Os resíduos de biomassa são utilizados para a geração de biocombustível e biogás;
- **N_3** – Os resíduos de biomassa são descartados ou deixados para se decompor em condições predominantemente aeróbicas; e
- **N_4** – Os resíduos de biomassa são queimados de forma descontrolada, sem serem utilizados para propósitos de geração de energia.

4.2.4.4 Potencial de Economia Circular

O indicador avalia a capacidade do projeto em promover o reaproveitamento de resíduos, subprodutos ou energia residual dentro do sistema produtivo. O indicador é baseado no princípio da economia circular, nos quais os resíduos que seriam desperdiçados passam a ser reinseridos como insumos em novos processos produtivos ou energéticos, maximizando o aproveitamento dos recursos disponíveis.

Nesse contexto, projetos que utilizam resíduos orgânicos, biomassas residuais ou gases que seriam descartados ou emitidos para a atmosfera tendem a apresentar maior grau de potencial de economia circular. Os projetos de geração de energia renovável, como plantas fotovoltaicas e eólicas, embora apresentem baixas emissões durante a operação, possuem menor contribuição direta para circularidade, pois dependem majoritariamente de recursos naturais primários (radiação solar e vento), sem reaproveitamento relevante de resíduos durante a fase operacional. Projetos de hidrogênio verde apresentam potencial intermediário de economia circular, não por promoverem reaproveitamento direto de resíduos orgânicos ou subprodutos materiais, mas por possibilitarem o aproveitamento de excedentes de eletricidade proveniente de fontes renováveis.

Diante disso, é possível estabelecer os níveis de impacto, atribuindo um valor conceitual (qualitativo, expresso em número) de grau de potencial de economia

circular para cada nível de impacto, em que o nível de impacto N_1 é o melhor possível (α^*) e N_4 é o pior aceitável (α^*):

- N_1 – 5 (grau);
- N_2 – 4 (grau);
- N_3 – 3 (grau); e
- N_4 – 2 (grau).

O critério é classificado como qualitativo, discreto, direto e com unidade em grau. Por se tratar de um critério qualitativo, ele é descrito e construído em níveis de impacto, que representam cenários diferentes de desempenho associados aos projetos.

4.2.4.5 Risco de Impacto sobre Ecossistemas e Biodiversidade

O indicador avalia o potencial do projeto em causar impactos negativos sobre o ecossistema e sobre a biodiversidade, decorrentes da implantação, operação e infraestrutura dos projetos. O indicador considera possíveis alterações ambientais provocadas pela alteração no uso do solo, emissão de poluentes, ocupação do local, ruídos, assim como outros riscos à fauna e flora.

O critério é classificado como qualitativo, discreto, direto e com unidade adimensional. É um critério qualitativo, descrito e construído em níveis de impacto, que representam cenários diferentes de desempenho associados aos projetos, sendo o nível de impacto N_1 o melhor possível (α^*) e N_4 o pior aceitável (α^*):

- N_1 – Projeto de hidrogênio que exige elevada demanda elétrica proveniente de fontes renováveis, elevado consumo de água para produção de hidrogênio por eletrólise, pode ocupar uma área considerável e ter risco de segurança no armazenamento;
- N_2 – Projetos eólicoelétricos e solares fotovoltaicos que ocupam extensas áreas territoriais, causando modificação da paisagem e no uso do solo, interferência na fauna;
- N_3 – Projeto de biogás proveniente de aterro sanitário que ocupa área considerável, causando alteração na paisagem, pode ocorrer emissões por vazamento de metano, há certo risco de contaminação do solo; e
- N_4 – Projetos de biomassa que há uso intensivo do solo devido à plantações dedicadas, prática de monoculturas, modificação da vegetação natural, emissão de poluentes causados pela queima dos resíduos e pelo transporte da biomassa, evasão da fauna.

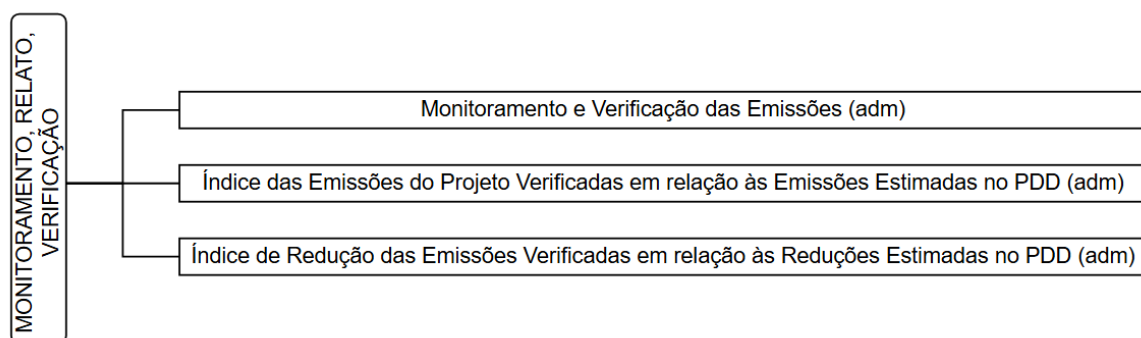
4.2.5 Ponto de Vista Fundamental: Monitoramento, Relato e Verificação

O PVF Monitoramento, Relato e Verificação (MRV) avalia a robustez dos sistemas utilizados pelos projetos de carbono para monitoramento, reporte e verificação das emissões. Esse PVF está diretamente relacionado à qualidade e confiabilidade das informações utilizadas na quantificação dos créditos de carbono, sendo essencial para garantir transparência, rastreabilidade e integridade ambiental dos resultados obtidos.

Os indicadores que compõem este PVF contemplam o nível de desenvolvimento dos sistemas de MRV adotados pelos projetos, assim como a consistência entre os valores estimados no PDD do Projeto e os valores efetivamente verificados após a implementação. Dessa forma, este PVF permite avaliar não apenas a precisão das estimativas *ex-ante*, mas também a qualidade do acompanhamento *ex-post* das emissões e reduções.

A Figura 13 apresenta a decomposição do PVF Monitoramento, Relato e Verificação (MRV) em seus respectivos descritores. Em seguida, cada descritor é definido e analisado individualmente, destacando suas características e sua relevância para a avaliação ambiental dos projetos de carbono.

Figura 13 – Indicadores do PVF Monitoramento, Relato, Verificação



Fonte: Elaboração Própria (2026).

4.2.5.1 Monitoramento e Verificação das Emissões

O indicador avalia o avanço tecnológico dos sistemas de monitoramento e verificação das emissões empregados pelo projeto. A importância de utilizar sistemas robustos de MRV (*Measurement, Reporting and Verification*) é fundamental

para garantir transparência, rastreabilidade, integridade e credibilidade dos créditos de carbono emitidos.

O critério é classificado como qualitativo, discreto, construído e com unidade adimensional. Os níveis de impacto foram definidos de acordo com o nível de automação e integração tecnológica dos processos de monitoramento e verificação. Quanto mais avançado for o sistema de MRV, maior tende a ser a frequência e confiabilidade dos dados coletados, assim o nível de impacto N_1 é o melhor possível (a^*) e N_4 é o pior aceitável (a^*):

- **N_1** – Monitoramento digital integrado, com sistema automatizado de monitoramento em tempo real utilizando sensores IoT, plataformas de análise com Inteligência Artificial e Machine Learning, podendo ou não ter integração com Digital Twins da planta energética, apresenta rastreabilidade e sistemas de auditoria;
- **N_2** – Monitoramento digital automatizado, sistema com sensores digitais e análise de dados, com medições contínuas da geração e do consumo, além de cálculos automatizados de emissões;
- **N_3** – Monitoramento parcialmente automatizado, com uso de instrumentos digitais convencionais para medir a geração de energia, fluxo de biomassa e parâmetros operacionais, mas o registro e processamento dos dados ocorre sem integração completa entre os sistemas; e
- **N_4** – Monitoramento manual ou pouco estruturado, as medições são realizadas com instrumentos básicos ou por meio de estimativas periódicas, baixa frequência de coleta de dados e ausência de sistemas automatizados de monitoramento.

4.2.5.2 *Índice das Emissões do Projeto Verificadas em relação às Emissões Estimadas no PDD*

O indicador é definido como a razão entre as emissões verificadas com a implementação do projeto (EP_{Verif}) e as emissões estimadas antes da implementação do projeto (EP_{Prosp}), conforme a Equação (27) . O índice permite avaliar a qualidade da estimativa feita à *ex-ante* em relação às emissões que realmente ocorreram após a implementação do projeto. Dessa forma, é possível mensurar a precisão das estimativas e assim garantir a credibilidade dos créditos de carbono gerados.

Um tema muito importante no mercado de créditos de carbono é em relação à corretas estimativas das emissões no cenário de referencia e também da

importância de ter mecanismos robustos de MRV para garantir o monitoramento e verificação das emissões. Tais aspectos fortalecem a confiança, credibilidade e integridade ambiental dos créditos de carbono, evitando emissão de créditos superestimados.

O indicador é classificado como crescente, uma vez que valores próximos à 100% evidenciam que os cálculos das estimativas foram precisas e os resultados consistentes. Os índices menores indicam diferenças expressivas entre os valores estimados e os verificados, indicando uma baixa acurácia e desvios em relação ao desempenho esperado do projeto, sendo também classificado como quantitativo, direto, contínuo e com unidade em %.

$$AE_{projeto} = \frac{EP_{verif}}{EP_{prospec}} \quad (27)$$

Em que, $AE_{projeto}$ é o índice de acurácia entre as emissões verificadas do projeto em relação às emissões estimadas à *ex-ante* do projeto [%]; EP_{verif} é a emissão verificada do projeto [tCO₂/ano]; e $EP_{prospec}$ é a emissão estimada do projeto à *ex-ante* [tCO₂/ano].

4.2.5.3 Índice de Redução das Emissões Verificadas em relação às Reduções Estimadas no PDD

O indicador é definido como a razão entre as reduções de emissões verificadas com a implementação do projeto (RE_{verif}) e as reduções de emissões estimadas antes da implementação do projeto (RE_{prosp}), conforme a Equação (28). O índice avalia a qualidade da estimativa de reduções das emissões feita à *ex-ante* em relação às reduções monitoradas que realmente ocorreram após a implementação do projeto. Dessa forma, é possível mensurar a precisão das estimativas de reduções e assim garantir a credibilidade dos créditos de carbono gerados.

Quanto maior o valor do indicador mais precisas foram as estimativas de reduções de emissões feitas à *ex-ante*. Por outro lado, índices menores indicam diferenças expressivas entre os valores estimados e os verificados, apontando uma baixa acurácia e desvios em relação ao desempenho esperado do projeto.

$$AR_{projeto} = \frac{RE_{verif}}{RE_{prospec}} \quad (28)$$

Em que, $AR_{projeto}$ é o índice de acurácia entre as reduções das emissões verificadas do projeto em relação às reduções das emissões estimadas à *ex-ante* do projeto [%]; RE_{verif} é a redução das emissões verificadas do projeto [tCO₂/ano]; e $RE_{prospec}$ é a redução das emissões estimadas do projeto à *ex-ante* [tCO₂/ano];

O indicador é classificado como quantitativo, direto, contínuo e com unidade em %, sendo também classificado como crescente, uma vez que maiores valores percentuais indicam um melhor desempenho do projeto.

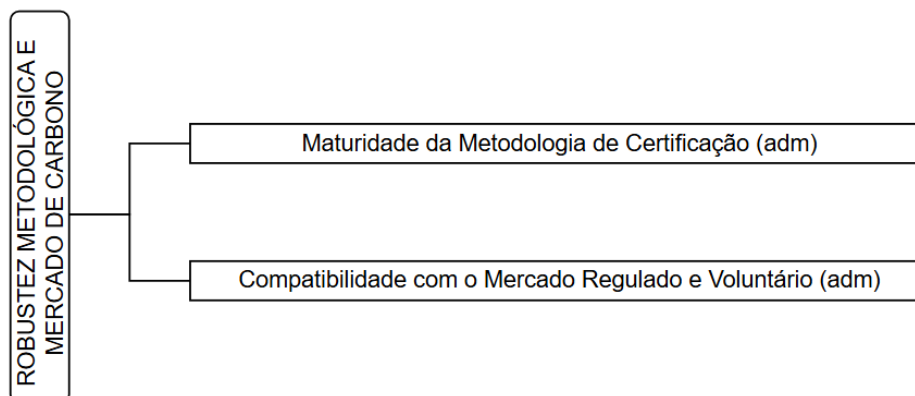
4.2.6 Ponto de Vista Fundamental: Robustez Metodológica e Mercado de Carbono

O PVF Robustez Metodológica e Mercado de Carbono avalia o grau de consolidação das metodologias de certificação utilizadas pelos projetos, bem como sua aceitação e compatibilidade com os principais padrões do mercado regulado e voluntário de carbono. Esse PVF está associado à credibilidade institucional dos projetos, refletindo o nível de maturidade das metodologias empregadas e sua aderência às regras e mecanismos internacionais de certificação.

Os indicadores que compõem este PVF permitem analisar tanto a maturidade das metodologias utilizadas, considerando seu nível de consolidação e aplicação em projetos de diferentes escalas, quanto sua compatibilidade com os principais sistemas de certificação existentes, incluindo o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), o Mecanismo do item 6.4 do Acordo de Paris e os padrões do mercado voluntário, como Verra e Gold Standard. Dessa forma, este PVF fornece uma visão sobre o grau de confiabilidade metodológica e inserção do projeto no mercado global de carbono.

A Figura 14 apresenta a decomposição do PVF Robustez Metodológica e Mercado de Carbono em seus respectivos descritores. Em seguida, cada descritor é definido e analisado individualmente, destacando sua relevância para a avaliação da robustez institucional e metodológica dos projetos de carbono.

Figura 14 – Indicadores do PVF Robustez Metodológica e Mercado de Carbono



Fonte: Elaboração Própria (2026).

4.2.6.1 Maturidade da Metodologia de Certificação

O indicador avalia o grau de consolidação, de robustez metodológica e nível de difusão da metodologia de certificação de créditos de carbono utilizada por cada projeto. A UNFCCC classifica as metodologias de certificação em 4 grandes grupos: Metodologias “ACM”, “AM”, “AMS” e “A/R”.

As metodologias iniciadas com a sigla ACM (*Approved Consolidated Methodology*) são metodologias amplamente consolidadas e são aplicáveis a projetos de larga escala, implica que esta metodologia já passou por várias atualizações e otimizações ao longo dos anos. Metodologias ACM apresentam procedimentos de cálculos e monitoramento de emissões consolidados e validados, e apresentam também uma grande disponibilidade de dados históricos e projetos públicos para consulta. A maturidade de metodologias desse tipo garante uma maior previsibilidade na elaboração do Documento de Concepção do Projeto (PDD) e um menor risco associado à validação e verificação junto às entidades certificadoras.

As metodologias iniciadas com a sigla AM (*Approved Methodology*) são metodologias que já foram aprovadas e validadas formalmente pela UNFCCC, porém são mais recentes e com nível de maturidade ainda em crescimento, com maiores chances de sofrer melhorias e adequações ao longo do tempo. Também são metodologias aplicáveis a projetos de larga escala, mas por terem menor tempo de existência, as metodologias apresentam menor quantidade de projetos públicos e dados históricos.

As metodologias iniciadas com a sigla AMS (*Approved Methodology for Small-scale project activities*) possuem a mesma características das metodologia “AM”, porém aplicáveis a projetos menores, de pequena escala. Por fim, as metodologias iniciadas com a sigla A/R (*Afforestation/Reforestation*) são metodologias exclusivamente desenvolvidas para projetos florestais que fazem sequestro de carbono da atmosfera (*carbon sequestration*) através de atividades de florestamento e reflorestamento. Por fugirem do escopo do estudo de caso, metodologias “A/R” não foram incluídas na construção dos indicadores.

O critério é classificado como qualitativo, discreto, construído e com unidade adimensional. O critério foi construído em níveis de impacto, sendo o nível de impacto N_1 o melhor possível (α^*) e N_3 o pior aceitável (α^*):

- **N_1** – Projeto com metodologia ACM (*Approved Consolidated Methodology*);
- **N_2** – Projeto com metodologia AM (*Approved Methodology*); e
- **N_3** – Projeto com metodologia AMS (*Approved Methodology for Small-scale project activities*).

4.2.6.2 Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário

O indicador avalia o grau de compatibilidade do projeto e de sua metodologia ao mercado regulado por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) da UNFCCC, e de sua adaptação ao novo Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (item 6.4), mas, também, a compatibilidade com os padrões de certificação e comercialização de créditos de carbono do mercado voluntário, como Verra e Gold Standard.

As metodologias mais importantes para o estudo de caso são ACM0006, ACM0001, ACM0002 e AM0124 que correspondem às metodologias aplicáveis a projetos de biomassa, biogás, solar fotovoltaico e hidrogênio verde.

Projetos de biomassa utilizam a metodologia ACM0006 (Geração de eletricidade e calor a partir da biomassa) do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) da UNFCCC. Ainda não houve nenhum tipo de adaptação ou modificação dessa metodologia para a transição ao Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (item 6.4), que utiliza a mesma metodologia vigente (ACM0006) para os novos projetos desse tipo. O Verra e o Gold Standard, principais padrões de certificação do

mercado voluntário, utilizam também a metodologia ACM0006 vigente da UNFCCC sem quaisquer mudanças ou adaptações para os seus padrões de certificação.

Projetos de biogás utilizam a metodologia ACM0001 (Uso e queima de biogás proveniente de aterro sanitário para geração de eletricidade) do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) da UNFCCC. A metodologia sofreu uma adaptação para a transição ao Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (item 6.4), sendo denominada pela sigla “A6.4-AMM-001” que entrou em vigência em 30 de Outubro de 2025 para os novos projetos desse tipo. No mercado voluntário, o Verra também utiliza uma versão revisada da metodologia ACM0001, denominada de “VMR0016” que faz modificações pontuais na metodologia do mercado regulado. O padrão Gold Standard também utiliza a metodologia ACM0001, mas sem modificações ou revisões na metodologia vigente.

Projetos eólicos e solar fotovoltaicos utilizam a metodologia ACM0002 (Geração de eletricidade conectada à rede a partir de fontes renováveis) do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) da UNFCCC. Ainda não houve nenhum tipo de adaptação ou modificação dessa metodologia para a transição ao Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (item 6.4), que utiliza a mesma metodologia vigente (ACM0002) para os novos projetos desse tipo. No mercado voluntário, o Verra utiliza uma versão revisada da metodologia ACM0002, denominada de “VMR0017” que faz modificações pontuais na metodologia do mercado regulado. O padrão Gold Standard também utiliza a metodologia ACM0002, mas sem modificações ou revisões na metodologia vigente.

Projetos de hidrogênio verde utilizam a metodologia AM0124 (Produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água) do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) da UNFCCC. Ainda não houve nenhum tipo de adaptação ou modificação dessa metodologia para a transição ao Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (item 6.4), que utiliza a mesma metodologia vigente (AM0124) para os novos projetos desse tipo. O Verra utiliza também a metodologia AM0124 vigente da UNFCCC sem quaisquer mudanças ou adaptações para os seus padrões de certificação. Já, o padrão de certificação do mercado voluntário Gold Standard não tem metodologia vigente para projetos de hidrogênio, uma vez que o padrão Gold Standard não tem foco nesses tipos de projetos.

O critério é classificado como qualitativo, discreto, construído e com unidade adimensional. Por se tratar de um critério qualitativo, ele é descrito e construído em níveis de impacto, que representam cenários diferentes de desempenho associados aos projetos, sendo o nível de impacto N_1 o melhor possível (a^*) e N_3 o pior aceitável (a^*):

- **N_1** – Projeto com metodologia consolidada no mercado regulado através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e com metodologia atualmente adaptada ao novo ao Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (item 6.4). A metodologia do projeto tem versões adaptadas ou utiliza a mesma versão do MDL para os principais padrões de certificação do mercado voluntário, como Verra e Gold Standard;
- **N_2** – Projeto com metodologia consolidada no mercado regulado através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), mas sem adaptação vigente ao novo Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (item 6.4). A metodologia do projeto tem versões adaptadas ou utiliza a mesma versão do MDL para os principais padrões de certificação do mercado voluntário, como Verra e Gold Standard; e
- **N_3** – Projeto com metodologia ainda não consolidada no mercado regulado, com metodologia vigente do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), mas sem adaptação vigente ao novo Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (item 6.4). A metodologia do projeto tem versões adaptadas ou utiliza a mesma versão do MDL para os principais padrões de certificação do mercado voluntário, mas algum desses padrões ainda não tem a metodologia vigente.

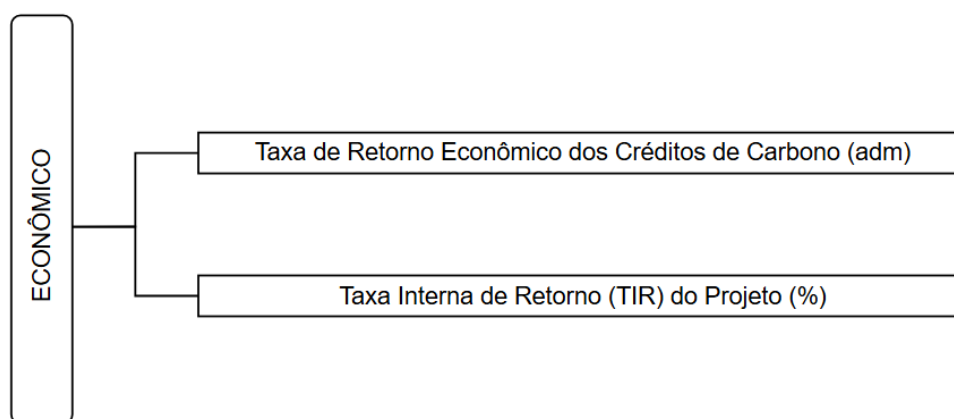
4.2.7 Ponto de Vista Fundamental: Econômico

O PVF Econômico avalia a viabilidade financeira dos projetos de carbono, considerando a capacidade de geração de receitas a partir da comercialização de créditos de carbono e o retorno econômico associado ao investimento. Esse PVF está diretamente relacionado à atratividade dos projetos sob a perspectiva do investidor, sendo fundamental para analisar se os benefícios financeiros obtidos com a venda dos créditos são suficientes para justificar a implementação do projeto.

Os indicadores que compõem este PVF permitem mensurar tanto o retorno econômico específico dos créditos de carbono em relação ao investimento inicial quanto a rentabilidade global do projeto, representada pela Taxa Interna de Retorno (TIR). Dessa forma, este PVF fornece uma avaliação financeira integrada, complementando as dimensões técnica, ambiental e metodológica do modelo multicriterial.

A Figura 15 apresenta a decomposição do PVF Econômico em seus respectivos descritores. Em seguida, cada descritor é definido e analisado individualmente, destacando sua relevância para a avaliação da viabilidade econômica dos projetos de carbono.

Figura 15 – Indicadores do PVF Econômico



Fonte: Elaboração Própria (2026).

4.2.7.1 Taxa de Retorno Econômico dos Créditos de Carbono

O indicador avalia o potencial de retorno financeiro com a comercialização dos créditos de carbono frente ao investimento com a implementação do projeto. O indicador é crucial para a viabilidade econômica do projeto, e pode ser calculado como a razão entre a receita esperada proveniente da venda dos créditos de carbono e o investimento total necessário para implementação do projeto. A receita esperada, por sua vez, é calculada como o produto entre a quantidade prevista de CERs (Certificados de Emissões Reduzidas) em tCO₂e e o preço médio esperado de cada crédito de carbono no mercado regulado ou voluntário.

Os valores elevados desse indicador representam alta atratividade econômica e que o projeto será economicamente viável. O cálculo é baseado na razão entre receita gerada com a comercialização dos créditos de carbono gerados e CAPEX inicial do investimento com o projeto. O indicador é classificado como quantitativo, direto, direto e com unidade em adimensional, sendo também classificado como crescente, uma vez que maiores valores percentuais indicam um melhor desempenho do projeto.

4.2.7.2 Taxa Interna de Retorno (TIR) do Projeto

O indicador avalia a atratividade econômica do projeto por meio da Taxa Interna de Retorno (TIR), considerando as receitas anuais provenientes da comercialização de créditos de carbono ao longo do período de creditação e o investimento inicial necessário para implementação do projeto.

A TIR corresponde à taxa de desconto que torna nulo o Valor Presente Líquido (VPL) dos fluxos de caixa do projeto. Valores elevados indicam maior rentabilidade, maior capacidade de recuperação do investimento inicial e maior viabilidade econômica do projeto. O cálculo foi realizado com base nos fluxos anuais de receitas provenientes da venda de CERs e no CAPEX inicial do projeto. O indicador é classificado como quantitativo, direto, contínuo e com unidade em adimensional, sendo também classificado como crescente, uma vez que maiores valores percentuais indicam um melhor desempenho do projeto.

4.3 Considerações

Neste capítulo foi apresentada a modelagem e implementação do modelo multicriterial proposto, incluindo a estruturação da árvore de decisão, a definição dos Pontos de Vista Fundamentais (PVFs) e a construção dos seus respectivos descritores. Ademais foram detalhados os descritores nos PVFs técnico, ambiental, econômico, linha de base, adicionalidade, MRV e robustez metodológica, que compõem a estrutura de avaliação do modelo.

O modelo foi estruturado de forma a permitir a aplicação dos métodos de apoio à decisão apresentados no Capítulo 3, possibilitando a avaliação integrada dos projetos de crédito de carbono. O capítulo seguinte apresenta o estudo de caso, no qual os critérios e descritores definidos são aplicados a diferentes projetos de energia renovável, permitindo a análise comparativa dos resultados obtidos.

5 ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é realizada a aplicação do modelo multicriterial proposto para a avaliação integrada de projetos de crédito de carbono associados a diferentes fontes renováveis de energia. O estudo de caso tem como objetivo demonstrar a operacionalização do modelo proposto e verificar sua capacidade de apoiar a tomada de decisão na seleção e priorização de projetos de carbono.

No estudo de caso foram selecionados cinco projetos representativos das principais tecnologias renováveis analisadas neste trabalho: biomassa, biogás, energia eólica, energia solar fotovoltaica e hidrogênio verde. Cada projeto constitui uma alternativa de decisão e será avaliado com base nos Pontos de Vista Fundamentais (PVFs) e descritores propostos.

Inicialmente, são determinados os *trade-offs* dos PVFs e de seus respectivos descritores, representando a importância relativa de cada critério dentro da estrutura hierárquica do modelo. Em seguida, é construída a matriz de consequências contendo os desempenhos das alternativas para cada descritor, em suas unidades de medida originais. A partir desses dados, são realizados os cálculos da matriz de indiferença (K) e das funções de valor, que representam os desempenhos locais das alternativas em cada critério.

Posteriormente, por meio da agregação aditiva, os desempenhos locais são combinados com os respectivos *trade-offs*, possibilitando a obtenção do desempenho global de cada projeto e o estabelecimento de um *ranking* das alternativas. Dessa forma, torna-se possível identificar quais projetos apresentam melhor desempenho considerando simultaneamente aspectos técnicos, ambientais, econômicos, metodológicos, de linha de base, adicionalidade e Monitoramento, Relato e Verificação (MRV).

Por fim, é realizada uma análise de sensibilidade sobre a alternativa com melhor desempenho global, avaliando a robustez da solução encontrada. Essa análise consiste em variar a importância relativa do critério de maior impacto até que a segunda melhor alternativa passe a ocupar a primeira posição no *ranking*, permitindo verificar a estabilidade dos resultados obtidos pelo modelo proposto.

5.1 Projetos Avaliados

Para a aplicação do modelo multicriterial proposto, foram selecionados cinco projetos de crédito de carbono associados a diferentes fontes renováveis de energia: biomassa, biogás, solar fotovoltaica, eólioelétrica e hidrogênio verde. A escolha de projetos pertencentes a diferentes tecnologias teve como objetivo ampliar a diversidade da análise e possibilitar a comparação entre projetos com características técnicas, ambientais, econômicas e metodológicas distintas.

Os projetos selecionados possuem documentação pública disponível para consulta, principalmente por meio dos Documentos de Concepção de Projeto (*Project Design Documents* – PDDs) registrados no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) da UNFCCC. A partir dessas informações foram obtidos os dados necessários para o preenchimento dos descritores do modelo multicriterial.

As subseções a seguir apresentam uma breve caracterização de cada projeto, destacando sua localização, tecnologia empregada, cenário de linha de base e metodologia de certificação utilizada.

5.1.1 Projeto A: Planta de Biomassa para Cogeração de Calor e Energia Elétrica

O projeto A é uma planta de biomassa para a cogeração de energia elétrica e calor. O projeto está localizado em Jilin Liaoyuan, na China. A implementação do projeto proposto permitiu o aproveitamento integral da biomassa, utilizando também os resíduos de biomassa locais excedentes, principalmente palha de milho, para a geração de calor e eletricidade. O cenário de linha de base era de que a eletricidade e calor foram geradas para a Rede Elétrica do Nordeste da China por meio da queima de combustíveis fósseis e os resíduos de biomassa eram descartados ou deixados para se decompor de forma não controlada. O período de creditação do projeto foi de 2010 a 2017 (UNFCCC, 2026a).

O projeto utiliza a metodologia de certificação ACM0006 (Geração de eletricidade e calor a partir da biomassa) do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) da UNFCCC. Ainda não houve nenhum tipo de adaptação ou modificação dessa metodologia para a transição ao Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris

(item 6.4), sendo a metodologia ACM0006 ainda vigente para novos projetos desse tipo. O Verra e o Gold Standard, principais padrões de certificação do mercado voluntário, utilizam também a metodologia ACM0006 vigente da UNFCCC sem quaisquer mudanças ou adaptações para os seus padrões de certificação (UNFCCC, 2026b).

5.1.2 Projeto B: Planta de Biogás de Aterro Sanitário

O projeto B é uma planta de biogás proveniente de aterro sanitário para geração de calor e energia elétrica. O projeto está localizado no aterro sanitário de Dois Arcos, no estado do Rio de Janeiro, Brasil. A implementação do projeto possibilitou a captura do metano para cogeração de energia elétrica e calor. O cenário de linha de base era emissão de metano diretamente na atmosfera, em que a geração de energia para os processos era proveniente do gás natural. O período de creditação do projeto foi de 2016 a 2023 (UNFCCC, 2026c).

O projeto utiliza a metodologia ACM0001 (Uso e queima de biogás proveniente de aterro sanitário para geração de eletricidade) do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) da UNFCCC. A metodologia sofreu uma adaptação para a transição ao Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (item 6.4), que agora passa a ser denominada pela sigla “A6.4-AMM-001” que entrou em vigência em 2025 para os novos projetos desse tipo. No mercado voluntário, o Verra também utiliza uma versão revisada da metodologia ACM0001, denominada de “VMR0016” que faz modificações pontuais na metodologia do mercado regulado. O padrão Gold Standard também utiliza a metodologia ACM0001, mas sem modificações ou revisões na metodologia vigente (UNFCCC, 2026d).

5.1.3 Projeto C: Planta Solar Fotovoltaica

O projeto C é uma planta solar fotovoltaica localizada na província de Antofagasta no Chile. O projeto consistia na construção e operação de uma usina solar fotovoltaica. A implementação do projeto possibilitou a geração de energia elétrica através de fonte renovável. O cenário de linha de base era a geração de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis como carvão e óleo proveniente da

rede elétrica chilena. O projeto é classificado na metodologia vigente como uma usina do tipo *Greenfield* “uma nova usina de energia renovável construída e operada em um local onde nenhuma usina de energia renovável operava antes da implementação da atividade do projeto”. O período de creditação do projeto foi de 2019 a 2025 (UNFCCC, 2026e).

O projeto utiliza a metodologia ACM0002 (Geração de eletricidade conectada à rede a partir de fontes renováveis) do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) da UNFCCC. Ainda não houve nenhum tipo de adaptação ou modificação dessa metodologia para a transição ao Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (item 6.4), que utiliza a mesma metodologia vigente (ACM0002) para os novos projetos desse tipo. No mercado voluntário, o Verra utiliza uma versão revisada da metodologia ACM0002, denominada de “VMR0017” que faz modificações pontuais na metodologia do mercado regulado. O padrão Gold Standard também utiliza a metodologia ACM0002, mas sem modificações ou revisões na metodologia vigente (UNFCCC, 2026f).

5.1.4 Projeto D: Planta Eólicoelétrica

O projeto D é uma planta eólicoelétrica para geração de energia elétrica. Projeto Eólico, localizado na região da Patagônia, Argentina. O projeto é composto por 3 parques eólicos com uma potência instalada de 117 MW. A implementação do projeto possibilitou a geração de energia elétrica através de fonte renovável. O cenário de linha de base era uma geração de energia elétrica proveniente de combustíveis fósseis de usinas termelétricas da rede elétrica argentina. O período de creditação foi de 2015 a 2021 (UNFCCC, 2026g).

O projeto utiliza a metodologia ACM0002 (Geração de eletricidade conectada à rede a partir de fontes renováveis) do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) da UNFCCC. Ainda não houve nenhum tipo de adaptação ou modificação dessa metodologia para a transição ao Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (item 6.4), que utiliza a mesma metodologia vigente (ACM0002) para os novos projetos desse tipo. No mercado voluntário, o Verra utiliza uma versão revisada da metodologia ACM0002, denominada de “VMR0017” que faz modificações pontuais na metodologia do mercado regulado. O padrão Gold

Standard também utiliza a metodologia ACM0002, mas sem modificações ou revisões na metodologia vigente (UNFCCC, 2026f).

5.1.5 Projeto E: Planta de Hidrogênio por Eletrólise da Água

O projeto E é uma planta de produção de hidrogênio por eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis. Em virtude da escassez de projetos públicos de hidrogênio com documentação completa, parte das informações necessárias para a análise foi complementada a partir de dados disponíveis e de premissas compatíveis com a metodologia adotada. O único projeto público encontrado, utiliza o hidrogênio para gerar eletricidade encontrava-se com dados incompletos no seu PDD. O cenário de linha de base que foi considerado é o de produção energética baseada em gás natural. O período de creditação foi de 2019 a 2025 (VERRA, 2026).

O projeto utiliza a metodologia AM0124 (Produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água) do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) da UNFCCC. Ainda não houve nenhum tipo de adaptação ou modificação dessa metodologia para a transição ao Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (Artigo 6.4), que utiliza a mesma metodologia vigente (AM0124) para os novos projetos desse tipo. O Verra utiliza também a metodologia AM0124 vigente da UNFCCC sem quaisquer mudanças ou adaptações para os seus padrões de certificação. Já o padrão de certificação do mercado voluntário Gold Standard não tem metodologia vigente para projetos de hidrogênio, uma vez que o padrão Gold Standard não tem foco nesses tipos de projetos (UNFCCC, 2026h).

5.2 Trade-offs

Nesta seção são determinados os *trade-offs* que representam a importância relativa dos Pontos de Vista Fundamentais (PVFs) e dos descritores que compõem o modelo multicriterial de apoio à decisão. Inicialmente, são calculados os *trade-offs* dos PVFs por meio do método *Direct Rating*, refletindo a contribuição de cada ponto de vista para o objetivo global da avaliação. Em seguida, são determinados os *trade-offs* dos descritores pertencentes a cada PVF, pelo método

AHP, estabelecendo a importância relativa de cada descritor dentro do respectivo ponto de vista. Por fim, é calculado o *trade-off* global de cada descritor, obtido pela multiplicação entre o *trade-off* local do descritor e o *trade-off* do respectivo PVF, permitindo determinar a contribuição global de cada descritor na avaliação multicritério dos projetos de crédito de carbono.

5.2.1 *Trade-offs* dos Pontos de Vista Fundamentais

Os *trade-offs* refletem a importância relativa de um PVF em comparação com os demais PVFs analisados. Para determinar os *trade-offs* entre os Pontos de Vista Fundamentais (PVFs), utilizou-se o método de *Direct Rating*. Nesse processo, foram atribuídas notas a cada PVF, com base em sua importância ponderada em relação aos demais. O *trade-off* por *Direct Rating* é então calculado através da normalização proporcional das notas atribuídas a cada PVF, conforme a Equação (15). A partir dessa avaliação, obteve-se a importância relativa de cada um dos sete Pontos de Vista Fundamentais (PVFs) que compõem o modelo multicriterial, os valores dos *trade-offs* obtidos estão apresentados na Figura 16.

Figura 16 – *Trade-off* dos Pontos de Vista Fundamentais (PVFs)

PVF	TÉCNICO	LINHA DE BASE	ADICIONALIDADE	AMBIENTAL	MONITORAMENTO, RELATO, VERIFICAÇÃO (MRV)	ROBUSTEZ METODOLÓGICA E MERCADO DE CARBONO	ECONÔMICO
Nota	6	10	10	7	9	7	6
Trade-off	10,91%	18,18%	18,18%	12,73%	16,36%	12,73%	10,91%

Fonte: Elaboração Própria (2026).

5.2.2 *Trade-offs* dos descritores

Os *trade-offs* para os descritores sob um mesmo Ponto de Vista Fundamental (PVF) foram obtidos pelo método AHP. Para a obtenção desses *trade-offs* dos descritores foram realizadas uma sequência julgamentos e cálculos. Primeiramente, estabelece-se uma matriz de concordância com as comparações de cada par de descritores entre si, esta foi realizada conforme a escala de julgamento de preferência par a par, denominada de escala Saaty, presente na Tabela 1.

Após estabelecidas as preferências entre os descritores, é possível calcular os autovetores da matriz de concordância, conforme descrito na Equação (2) e posteriormente a normalização proporcional desses auto-vetores conforme a Equação (3). Após realizados os cálculos iniciais, o trade-off dos descritores sob um mesmo PVF são determinados em termos percentuais (%), como obtido pela Equação (13).

Ao final da análise, verifica-se a racionalidade da matriz de concordância construída a partir dos julgamentos do decisor para cada par de descritores. Para isso, primeiramente, deve-se calcular o maior autovalor da matriz conforme a Equação (4), para em seguida calcular o Coeficiente de Racionalidade (CR) através da Equação (6). A seguir são apresentados os *trade-offs* dos descritores de todos os PVFs que compõem o modelo multicriterial.

A Figura 17 apresenta o *trade-off* dos descritores do PVF Técnico, com destaque para o descritor “Fator de Emissão de CO₂ por Energia Elétrica Gerada” que apresentou o maior *trade-off* (44,16%), evidenciando sua maior importância relativa segundo as preferências do decisor. O coeficiente de racionalidade obtido foi de 1,04%, valor inferior ao limite de 10%, indicando consistência nos julgamentos realizados.

Figura 17 – Trade-off dos descritores do PVF Técnico

TÉCNICO								
CRITÉRIOS	Fator de Emissão de CO ₂ por Calor Gerado	Fator de Emissão de CO ₂ por Energia Elétrica Gerada	Fator de Emissão de CH ₄ Proveniente de Combustão para Geração de Calor	Eficiência na Geração de Eletricidade	Percentual de Combustíveis Fósseis Co-queimados	AUTO-VECTOR	NORMALIZAÇÃO PROPORCIONAL	TRADE-OFF
Fator de Emissão de CO ₂ por Calor Gerado	1	0,3333	1	3	1	1	0,1655	16,55%
Fator de Emissão de CO ₂ por Energia Elétrica Gerada	3	1	3	5	3	2,6673	0,4414	44,14%
Fator de Emissão de CH ₄ Proveniente de Combustão para Geração de Calor	1	0,3333	1	3	1	1	0,1655	16,55%
Eficiência na Geração de Eletricidade	0,3333	0,2	0,3333	1	0,3333	0,3749	0,0620	6,20%
Percentual de Combustíveis Fósseis Co-queimados	1	0,3333	1	3	1	1,0000	0,1655	16,55%
SOMA	6,3333	2,2	6,3333	15	6,3333	6,0422	1	100%
AUTO VALOR MÁX	5,0465							
CR	1,04%							

Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 18 apresenta os *trade-offs* dos descritores do PVF Linha de Base. O descritor "Emissões da Linha de Base Estimadas no PDD" apresentou a maior importância relativa (42,42%). O resultado evidencia a relevância atribuída pelo decisor na correta determinação das emissões do cenário de referência, que contribuem diretamente na determinação das reduções para gerar os créditos de carbono (CERs). O coeficiente de racionalidade obtido foi de 9,20%, valor inferior ao limite de 10%, indicando consistência no julgamento das preferências.

Figura 18 – Trade-off dos descritores do PVF Linha de Base

LINHA DE BASE								
CRITÉRIOS	Grau de Impacto na Transformação Energética do Cenário de Linha de Base	Fonte Energética para Produção de Hidrogênio na Linha de Base do Projeto	Emissões da Linha de Base Estimadas no PDD	Emissões do Projeto Estimadas no PDD	Redução das Emissões Estimadas no PDD	AUTO-VETOR	NORMALIZAÇÃO PROPORCIONAL	TRADE-OFF
Grau de Impacto na Transformação Energética do Cenário de Linha de Base	1	3	0,3333	1	0,2	0,7248	0,1153	11,53%
Fonte Energética para Produção de Hidrogênio na Linha de Base do Projeto	0,3333	1	0,2	0,3333	0,3333	0,3749	0,0596	5,96%
Emissões Totais da Linha de Base Estimadas no PDD	3	5	1	3	3	2,6673	0,4242	42,42%
Emissões do Projeto Estimadas no PDD	1	3	0,3333	1	0,3333	0,8027	0,1277	12,77%
Redução das Emissões Estimadas no PDD	5	3	0,3333	3	1	1,7188	0,2733	27,33%
SOMA	10,3333	15	2,2000	8,3333	4,8667	6,2885	1	100%
AUTO VALOR MÁX	5,4123							
CR	9,20%							

Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 19 apresenta os *trade-offs* dos descritores do PVF Adicionalidade. O descritor "Redução Verificada nas Emissões" recebeu o maior *trade-off* (43,10%), refletindo a importância atribuída às reduções efetivamente alcançadas pelos projetos. O coeficiente de racionalidade obtido foi de 2,89%.

Figura 19 – Trade-off dos descritores do PVF Adicionalidade

ADICIONALIDADE								
CRITÉRIOS	Emissões do Projeto Verificadas	Emissões Indiretas por Vazamento (Leakage)	Redução Verificada nas Emissões	Índice de Redução das Emissões em Relação à Linha de Base	Índice de Emissões do Projeto em Relação à Linha de Base	AUTO-VETOR	NORMALIZAÇÃO PROPORCIONAL	TRADE-OFF
Emissões do Projeto Verificadas	1	3	0,3333	1	1	1,0000	0,1616	16,16%
Emissões Indiretas por Vazamento (Leakage)	0,3333	1	0,2	0,2	0,2	0,3056	0,0494	4,94%
Redução Verificada nas Emissões	3	5	1	3	3	2,6673	0,4310	43,10%
Índice de Redução das Emissões	1	5	0,3333	1	1	1,1076	0,1790	17,90%
Índice de Emissões do Projeto em Relação à Linha de Base	1	5	0,3333	1	1	1,1076	0,1790	17,90%
SOMA	6,3333	19	2,2000	6,2000	6,2000	6,1880	1	100%
AUTO VALOR MÁX	5,1296							
CR	2,89%							

Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 20 apresenta os *trade-offs* para o PVF Ambiental. O descritor "Emissões de CO₂ associadas ao transporte" apresentou o maior *trade-off* (46,31%), O CR calculado foi de 1,64%, indicando uma matriz de concordância consistente.

Figura 20 – Trade-off dos descritores do PVF Ambiental

AMBIENTAL								
CRITÉRIOS	Emissões de CO2 associadas ao Transporte	Aproveitamento do Biogás	Aproveitamento dos Resíduos de Biomassa	Potencial de Economia Circular (grau)	Risco de Impacto sobre Ecossistemas e Biodiversidade (adm)	AUTO-VETOR	NORMALIZAÇÃO PROPORCIONAL	TRADE-OFF
Emissões de CO2 associadas ao Transporte	1	5	5	3	3	2,9542	0,4631	46,31%
Aproveitamento do Biogás	0,2	1	1	0,3333	0,3333	0,4670	0,0732	7,32%
Aproveitamento dos Resíduos de Biomassa	0,2	1	1	0,3333	0,3333	0,4670	0,0732	7,32%
Potencial de Economia Circular (grau)	0,3333	3	3	1	1	1,2457	0,1953	19,53%
Risco de Impacto sobre Ecossistemas e Biodiversidade (adm)	0,3333	3	3	1	1	1,2457	0	19,53%
SOMA	2,0667	13	13	5,6667	5,6667	6,3797	1	100%
AUTO VALOR MÁX	5,0734							
CR	1,64%							

Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 21 apresenta os *trade-offs* dos descritores do PVF Monitoramento, Relato e Verificação (MRV). Com destaque para "Monitoramento e Verificação das Emissões" que apresentou a maior importância relativa entre os descritores (63,70%), evidenciando a relevância de sistemas robustos de monitoramento para a credibilidade dos créditos de carbono. O coeficiente de racionalidade (CR) obtido foi de 3,32%, valor inferior ao limite de 10%, indicando consistência nas preferências julgadas pelo decisor.

Figura 21 – Trade-off do PVF Monitoramento, Relato, Verificação (MRV)

MONITORAMENTO, RELATO, VERIFICAÇÃO (MRV)						
CRITÉRIOS	Monitoramento e Verificação das Emissões	Índice das Emissões do Projeto Verificadas em relação às Emissões Estimadas no PDD	Índice de Redução das Emissões Verificadas em relação às Reduções Estimadas no PDD	AUTO-VETOR	NORMALIZAÇÃO PROPORCIONAL	TRADE-OFF
Monitoramento e Verificação das Emissões	1	5	3	2,4662	0,6370	63,70%
Índice das Emissões do Projeto Verificadas em relação às Emissões Estimadas no PDD	0,2	1	0,3333	0,4055	0,1047	10,47%
Índice de Redução das Emissões Verificadas em relação às Reduções Estimadas no PDD	0,3333	3	1	1,0000	0,2583	25,83%
SOMA	1,5333	9	4,3333	3,8717	1	100%
AUTO VALOR MÁX	3,0385					
CR	3,32%					

Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 22 apresenta os *trade-offs* dos descritores do PVF Robustez Metodológica e Mercado de Carbono. O descritor "Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário" apresentou o maior *trade-off* (75%), demonstrando a importância que o decisor atribui aos projetos capazes de serem inseridos em diferentes mercados de carbono. O coeficiente de racionalidade calculado foi de 0,00%, confirmando a consistência da matriz.

Figura 22 – Trade-off do PVF Robustez Metodológica e Mercado de Carbono

ROBUSTEZ METODOLÓGICA E MERCADO DE CARBONO					
CRITÉRIOS	Maturidade da Metodologia de Certificação (adm)	Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário (adm)	AUTO-VETOR	NORMALIZAÇÃO PROPORCIONAL	TRADE-OFF
Maturidade da Metodologia de Certificação (adm)	1	0,3333	0,5774	0,2500	25,00%
Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário (adm)	3	1	1,7321	0,7500	75,00%
SOMA	4	1,3333	2,3094	1	100%
AUTO VALOR MÁX	2,0000				
CR	0,00%				

Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 23 apresenta os *trade-offs* dos descritores do PVF Econômico. Ambos descritores apresentaram a mesma importância relativa frente às preferências do decisor, um *trade-off* de 50% para ambos, refletindo que o decisor julga ambos descritores igualmente preferenciais. O coeficiente de racionalidade obtido foi de 0,00%, indicando uma matriz de concordância consistente.

Figura 23 – Trade-off do PVF Econômico

ECONÔMICO					
CRITÉRIOS	Taxa de Retorno Econômico dos Créditos de Carbono	Taxa Interna de Retorno (TIR) do Projeto	AUTO-VETOR	NORMALIZAÇÃO PROPORCIONAL	TRADE-OFF
Taxa de Retorno Econômico dos Créditos de Carbono	1	1	1	0,5000	50,00%
Taxa Interna de Retorno (TIR) do Projeto	1	1	1	0,5000	50,00%
SOMA	2	2	2	1	100%
AUTO VALOR MÁX	2,0000				
CR	0,00%				

Fonte: Elaboração Própria (2026).

5.2.3 Trade-off Global dos Descritores

Após determinar os *trade-offs* dos Pontos de Vista Fundamentais (PVFs) e os *trade-offs* dos descritores, deseja-se calcular a importância global de cada descritor no contexto global do modelo multicriterial. Enquanto os *trade-offs* dos descritores representam sua importância relativa apenas dentro de seu respectivo PVF, os *trade-offs* globais permitem avaliar a contribuição de cada descritor frente a todos descritores que compõem o modelo.

O *trade-off* global de um descritor é obtido pela multiplicação do *trade-off* local desse critério pelo *trade-off* do seu Ponto de Vista Fundamental. O *trade-off* global obtido representa a importância do critério dentro do modelo multicriterial de decisão. A Equação (29) mostra o cálculo.

$$w_{i,Global} = w_{PVF,i} \times w_{D,i} \quad (29)$$

Em que, $w_{i,Global}$ é o *trade-off* global do descritor D_i ; $w_{PVF,i}$ é o *trade-off* do Ponto de Vista Fundamental PVF_i ; e $w_{D,i}$ é *trade-off* local do descritor D_i pertencente ao PVF_i .

A determinação dos *trade-offs* globais é importante para identificar quais descritores exercem maior influência sobre a avaliação final das alternativas, permitindo uma visão integrada global da estrutura de preferências do decisor. A Figura 24 apresenta o *trade-off* global dos descritores do modelo multicriterial.

Figura 24 – Trade-off Global dos Indicadores

PVF	TÉCNICO					LINHA DE BASE				
Trade-off	10,91%					18,18%				
Critério	Fator de Emissão de CO ₂ por Calor Gerado	Fator de Emissão de CO ₂ por Energia Elétrica Gerada	Fator de Emissão de CH ₄ Proveniente de Combustão para Geração de Calor	Eficiência de Geração de Eletricidade	Percentual de Combustíveis Fósseis Co-queimados	Grau de Impacto na Transformação Energética do Cenário de Linha de Base	Fonte Energética para Produção de Hidrogênio na Linha de Base do Projeto	Emissões da Linha de Base Estimadas no PDD	Emissões do Projeto Estimadas no PDD	Redução das Emissões Estimadas no PDD
Trade-off	16,55%	44,14%	16,55%	6,20%	16,55%	11,53%	5,96%	42,42%	12,77%	27,33%
w _i	1,81%	4,82%	1,81%	0,68%	1,81%	2,10%	1,08%	7,71%	2,32%	4,97%

PVF	ADICIONALIDADE					AMBIENTAL				
Trade-off	18,18%					12,73%				
Critério	Emissões do Projeto Verificadas	Emissões Indiretas por Vazamento	Redução de Emissões Verificadas	Índice de Redução das Emissões em Relação à Linha de Base	Índice de Emissões do Projeto em Relação à Linha de Base	Emissões de CO ₂ associadas ao Transporte	Aproveitamento do Biogás	Aproveitamento dos Resíduos de Biomassa	Potencial de Economia Circular (grau)	Risco de Impacto sobre Ecossistemas e Biodiversidade (adm)
Trade-off	16,16%	4,94%	43,10%	17,90%	17,90%	46,31%	7,32%	7,32%	19,53%	19,53%
w _i	2,94%	0,90%	7,84%	3,25%	3,25%	5,89%	0,93%	0,93%	2,49%	2,49%

PVF	MONITORAMENTO, RELATO, VERIFICAÇÃO			ROBUSTEZ METODOLÓGICA E MERCADO DE CARBONO		ECONÔMICO	
Trade-off	16,36%			12,73%		10,91%	
Critério	Monitoramento e Verificação das Emissões	Índice das Emissões do Projeto Verificadas em relação às Emissões Estimadas no PDD	Índice de Redução das Emissões Verificadas em relação às Reduções Estimadas no PDD	Maturidade da Metodologia de Certificação (adm)	Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário (adm)	Taxa de Retorno Econômico dos Créditos de Carbono	Taxa Interna de Retorno (TIR) do Projeto
Trade-off	63,70%	10,47%	25,83%	25,00%	75,00%	50,00%	50,00%
wi	10,42%	1,71%	4,23%	3,18%	9,55%	5,45%	5,45%

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Observa-se que o descritor "Monitoramento e Verificação das Emissões" apresentou o maior *trade-off* global (10,42%) dentre todos os descritores do modelo multicriterial. Esse resultado indica que, segundo as preferências do decisor, esse é o critério que exerce maior influência sobre a avaliação global dos projetos de crédito de carbono.

5.3 Matriz de Consequência

Os dados dos projetos para cada um dos critérios do modelo são dispostos na matriz de consequência (Figura 25), em suas dimensões e unidades de medida originais. Os dados são obtidos dos documentos públicos dos projetos disponíveis para consulta. O PDD (*Project Design Document*) é o documento mais importante do projeto e que contém as informações de concepção do projeto, incluindo cenário de linha de base, características técnicas e estimativas de emissões.

Além do PDD, os relatórios de monitoramento, verificação e validação apresentam as emissões que efetivamente ocorreram com a implementação do projeto e que foram verificadas e relatadas nesses documentos. Adicionalmente há também planilhas de cálculo dos desenvolvedores do projeto que contemplam a quantificação das emissões e outros dados técnicos.

Figura 25 – Matriz de Consequência dos Indicadores

PVF	TÉCNICO					LINHA DE BASE				
Alternativas	Fator de Emissão de CO ₂ por Calor Gerado (tCO ₂ /GJ)	Fator de Emissão de CO ₂ por Energia Elétrica Gerada (tCO ₂ /MWh)	Fator de Emissão de CH ₄ Proveniente de Combustão para Geração de Calor (tCH ₄ /GJ)	Eficiência na Geração de Eletricidade (%)	Percentual de Combustíveis Fósseis Co-queimados (%)	Grau de Impacto na Transformação Energética do Cenário de Linha de Base (adm)	Fonte Energética para Produção de Hidrogênio na Linha de Base do Projeto (adm)	Emissões da Linha de Base Estimadas no PDD (tCO ₂ /ano)	Emissões do Projeto Estimadas no PDD (tCO ₂ /ano)	Redução das Emissões Estimadas no PDD (tCO ₂ /ano)
Projeto A (Biomassa)	0,0748	0,9960	0,00001971	21	2,68	N1	NA	200269	10130	190139
Projeto B (Biogás)	0,0656	0,3231	0,00002150	34	8,57	N2	NA	60670	3470	57200
Projeto C (Solar)	0	0	0	19	0	N5	NA	17750	0	17750
Projeto D (Eólico)	0	0	0	42	0	N4	NA	321420	0	321420
Projeto E (Hidrogênio)	0	0	0	60	0	N3	N2	20100	0	20100

PVF	ADICIONALIDADE					AMBIENTAL				
Alternativas	Emissões do Projeto Verificadas (tCO ₂ /ano)	Emissões Indiretas por Vazamento (Leakage) (tCO ₂ /ano)	Redução Verificada nas Emissões (tCO ₂ /ano)	Índice de Redução das Emissões em Relação à Linha de Base (%)	Índice de Emissões do Projeto em Relação à Linha de Base (%)	Emissões de CO ₂ associadas ao Transporte (tCO ₂ /ano)	Aproveitamento do Biogás (adm)	Aproveitamento dos Resíduos de Biomassa (adm)	Potencial de Economia Circular (grau)	Risco de Impacto sobre Ecossistemas e Biodiversidade (adm)
Projeto A (Biomassa)	5226	37	189649	94,70	5,06	23	N1	N1	N2	N4
Projeto B (Biogás)	1435	25	12807	21,11	5,72	14	N2	N2	N1	N3
Projeto C (Solar)	0	0	10157	57,22	0	0	NA	NA	N4	N2
Projeto D (Eólico)	0	0	301430	93,78	0	0	NA	NA	N4	N2
Projeto E (Hidrogênio)	0	0	16200	80,60	0	0	NA	NA	N3	N1

PVF	MONITORAMENTO, RELATO, VERIFICAÇÃO (MRV)			ROBUSTEZ METODOLÓGICA E MERCADO DE CARBONO		ECONÔMICO	
Alternativas	Monitoramento e Verificação das Emissões (adm)	Índice das Emissões do Projeto Verificadas em relação às Emissões Estimadas no PDD (%)	Índice de Redução das Emissões Verificadas em relação às Reduções Estimadas no PDD (%)	Maturidade da Metodologia de Certificação (adm)	Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário (adm)	Taxa de Retorno Econômico dos Créditos de Carbono (adm)	Taxa Interna de Retorno (TIR) do Projeto (%)
Projeto A (Biomassa)	N3	51,59	99,74	N1	N2	1,18	13,56
Projeto B (Biogás)	N2	41,35	22,39	N1	N1	1,07	10,21
Projeto C (Solar)	N4	100	57,22	N1	N2	0,93	2,50
Projeto D (Eólico)	N2	100	93,78	N1	N2	0,98	4,54
Projeto E (Hidrogênio)	N1	100	80,60	N2	N3	0,86	1,17

Fonte: Elaboração Própria (2026).

5.4 Matriz de Indiferença

Após organizar os dados dos projetos na matriz de consequência, são construídas as escalas ordinais dos critérios (Figura 26). Uma escala ordinal é construída através do ordenamento das alternativas, ancoradas entre o desempenho da alternativa melhor possível (a^*) e o desempenho da alternativa pior aceitável (a_*) (Sica *et al.*, 2010).

Figura 26 – Escala Ordinal dos Indicadores

PORTFOLIO	TÉCNICO					LINHA DE BASE				
	Fator de Emissão de CO ₂ por Calor Gerado (tCO ₂ /GJ)	Fator de Emissão de CO ₂ por Energia Elétrica Gerada (tCO ₂ /MWh)	Fator de Emissão de CH ₄ Proveniente de Combustão para Geração de Calor (tCH ₄ /GJ)	Eficiência na Geração de Eletricidade (%)	Percentual de Combustíveis Fósseis Co-queimados (%)	Grau de Impacto na Transformação Energética do Cenário de Linha de Base (adm)	Fonte Energética para Produção de Hidrogênio na Linha de Base do Projeto (adm)	Emissões da Linha de Base Estimadas no PDD (tCO ₂ /ano)	Emissões do Projeto Estimadas no PDD (tCO ₂ /ano)	Redução das Emissões Estimadas no PDD (tCO ₂ /ano)
a^*	0	0	0	60	0	QUALITATIVO	QUALITATIVO	321420	0	321420
a_*	0,0748	0,9960	0,00002150	19	8,57			17750	10130	17750

PORTFOLIO	ADICIONALIDADE					AMBIENTAL				
	Emissões do Projeto Verificadas (tCO ₂ /ano)	Emissões Indiretas por Vazamento (Leakage) (tCO ₂ /ano)	Redução Verificada nas Emissões (tCO ₂ /ano)	Índice de Redução das Emissões em Relação à Linha de Base (%)	Índice de Emissões do Projeto em Relação à Linha de Base (%)	Emissões de CO ₂ associadas ao Transporte (tCO ₂ /ano)	Aproveitamento do Biogás (adm)	Aproveitamento dos Resíduos de Biomassa (adm)	Potencial de Economia Circular (grau)	Risco de Impacto sobre Ecossistemas e Biodiversidade (adm)
a^*	0	0	301430	94,70	0,00	0	QUALITATIVO	QUALITATIVO	QUALITATIVO	QUALITATIVO
a_*	5226	37	10157	21,11	5,72	23				

PORTFOLIO	MONITORAMENTO, RELATO, VERIFICAÇÃO (MRV)			ROBUSTEZ METODOLÓGICA E MERCADO DE CARBONO		ECONÔMICO	
	Monitoramento e Verificação das Emissões (adm)	Índice das Emissões do Projeto Verificadas em relação às Emissões Estimadas no PDD (%)	Índice de Redução das Emissões Verificadas em relação às Reduções Estimadas no PDD (%)	Maturidade da Metodologia de Certificação (adm)	Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário (adm)	Taxa de Retorno Econômico dos Créditos de Carbono (adm)	Taxa Interna de Retorno (TIR) do Projeto (%)
a*	QUALITATIVO	100	99,74	QUALITATIVO	QUALITATIVO	1,18	13,56
a*		41,35	22,39			0,86	1,17

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Após a construção das escala ordinais, é possível determinar os parâmetros K para cada um dos critérios quantitativos do modelo. A obtenção dos parâmetros K constitui uma das etapas iniciais do método MAUT e tem como objetivo normalizar os desempenhos das alternativas em uma escala comum, variando entre 0 e 1, sob um comportamento econômico indiferente. A determinação pode ser realizada por duas formulações distintas, dependendo da natureza do descritor. Para descritores quantitativos crescentes, o cálculo é realizado por meio da Equação (8). Já para descritores quantitativos decrescentes, utiliza-se a Equação (9).

A Figura 27 apresenta os valores dos parâmetros obtidos para cada projeto em cada descritor quantitativo. É possível observar que os descritores qualitativos não possuem valores associados, pois para os descritores qualitativos será empregado o método AHP.

Figura 27 – Matriz Intermediária do Cálculo dos Ks

MATRIZ INTERMEDIÁRIA	TÉCNICO					LINHA DE BASE				
	Fator de Emissão de CO2 por Calor Gerado (tCO2/GJ)	Fator de Emissão de CO2 por Energia Elétrica Gerada (tCO2/MWh)	Fator de Emissão de CH4 Proveniente de Combustão para Geração de Calor (tCH4/GJ)	Eficiência na Geração de Eletricidade (%)	Percentual de Combustíveis Fósseis Co-queimados (%)	Grau de Impacto na Transformação Energética do Cenário de Linha de Base (adm)	Fonte Energética para Produção de Hidrogênio na Linha de Base do Projeto (adm)	Emissões da Linha de Base Estimadas no PDD (tCO2/ano)	Emissões do Projeto Estimadas no PDD (tCO2/ano)	Redução das Emissões Estimadas no PDD (tCO2/ano)
CÁLCULO DO K	decrescente	decrescente	decrescente	crescente	decrescente	-	-	crescente	decrescente	crescente
Projeto A (Biomassa)	0	0	0,0833	0,0488	0,6873	QUALITATIVO	QUALITATIVO	0,6010	0	0,5677
Projeto B (Biogás)	0,1230	0,6756	0	0,3659	0			0,1413	0,6575	0,1299
Projeto C (Solar)	1	1	1	0	1			0	1	0
Projeto D (Eólico)	1	1	1	0,5610	1			1	1	1
Projeto E (Hidrogênio)	1	1	1	1	1			0,0077	1	0,0077

MATRIZ INTERMEDIÁRIA	ADICIONALIDADE					AMBIENTAL				
	Emissões do Projeto Verificadas (tCO2/ano)	Emissões Indiretas por Vazamento (Leakage) (tCO2/ano)	Redução Verificada nas Emissões (tCO2/ano)	Índice de Redução das Emissões em Relação à Linha de Base (%)	Índice de Emissões do Projeto em Relação à Linha de Base (%)	Emissões de CO2 associadas ao Transporte (tCO2/ano)	Aproveitamento do Biogás (adm)	Aproveitamento dos Resíduos de Biomassa (adm)	Potencial de Economia Circular (grau)	Risco de Impacto sobre Ecossistemas e Biodiversidade (adm)
CÁLCULO DO K	decrescente	decrescente	crescente	crescente	decrescente	decrescente	-	-	-	-
Projeto A (Biomassa)	0	0	0,6162	1	0,1156	0	QUALITATIVO	QUALITATIVO	QUALITATIVO	QUALITATIVO
Projeto B (Biogás)	0,7254	0,3243	0,0091	0	0	0,3913				
Projeto C (Solar)	1	1	0	0,4908	1	1				
Projeto D (Eólico)	1	1	1	0,9875	1	1				
Projeto E (Hidrogênio)	1	1	0,0207	0,8084	1	1				

MATRIZ INTERMEDIÁRIA	MONITORAMENTO, RELATO, VERIFICAÇÃO (MRV)			ROBUSTEZ METODOLÓGICA E MERCADO DE CARBONO		ECONÔMICO	
	Monitoramento e Verificação das Emissões (adm)	Índice das Emissões do Projeto Verificadas em relação às Emissões Estimadas no PDD (%)	Índice de Redução das Emissões Verificadas em relação às Reduções Estimadas no PDD (%)	Maturidade da Metodologia de Certificação (adm)	Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário (adm)	Taxa de Retorno Econômico dos Créditos de Carbono (adm)	Taxa Interna de Retorno (TIR) do Projeto (%)
CÁLCULO DO K	-	crescente	crescente	-	-	crescente	crescente
Projeto A (Biomassa)	QUALITATIVO	0,1745	1	QUALITATIVO	QUALITATIVO	1	1
Projeto B (Biogás)		0	0			0,6563	0,7296
Projeto C (Solar)		1	0,4503			0,2188	0,1073
Projeto D (Eólico)		1	0,9229			0,3750	0,2720
Projeto E (Hidrogênio)		1	0,7525			0	0

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Verifica-se que valores próximos de 1 indicam alternativas com desempenho mais favorável no respectivo descritor, enquanto valores próximos de 0 representam desempenhos menos favoráveis.

5.5 Matriz de Valor Econômico

A matriz de valor econômico (Figura 28) é composta pelos valores das funções de valor atribuídas a cada projeto em cada descritor do modelo multicriterial. Para os critérios quantitativos, a função de valor foi obtida por meio do método MAUT através da Equação (10), que utiliza os valores de indiferença (K) calculados anteriormente e o coeficiente α (alfa) de propensão/aversão que é definido pelo decisor *à ex-ante*. Caso o decisor atribua um coeficiente $\alpha > 0$ para um critério, o decisor apresentará um comportamento propenso aos melhores desempenhos, buscando se aproximar dos melhores resultados possíveis. E caso o decisor atribua $\alpha < 0$ para um critério, o decisor apresentará um comportamento avesso aos piores desempenhos, buscando se afastar dos piores resultados aceitáveis.

Figura 28 – Matriz de Valor Econômico $v(.)$ dos Projetos

$V(.)$	TÉCNICO					LINHA DE BASE				
	Fator de Emissão de CO ₂ por Calor Gerado (tCO ₂ /GJ)	Fator de Emissão de CO ₂ por Energia Elétrica Gerada (tCO ₂ /MWh)	Fator de Emissão de CH ₄ Proveniente de Combustão para Geração de Calor (tCH ₄ /GJ)	Eficiência na Geração de Eletricidade (%)	Percentual de Combustíveis Fósseis Co-queimados (%)	Grau de Impacto na Transformação Energética do Cenário de Linha de Base (adm)	Fonte Energética para Produção de Hidrogênio na Linha de Base do Projeto (adm)	Emissões da Linha de Base Estimadas no PDD (tCO ₂ /ano)	Emissões do Projeto Estimadas no PDD (tCO ₂ /ano)	Redução das Emissões Estimadas no PDD (tCO ₂ /ano)
ALFA	1	1	-1	1	-2	Qualitativo	Qualitativo	-1	2	1
Projeto A (Biomassa)	0	0	0,1264	0,0291	0,8640	1	-	0,7147	0	0,4447
Projeto B (Biogás)	0,0762	0,5617	0	0,2571	0	0,4230	-	0,2085	0,4264	0,0807
Projeto C (Solar)	1	1	1	0	1	0	-	0	1	0
Projeto D (Eólico)	1	1	1	0,4379	1	0,0799	-	1	1	1
Projeto E (Hidrogênio)	1	1	1	1	1	0,3027	0,3376	0,0122	1	0,0045

V(.)	ADICIONALIDADE					AMBIENTAL				
	Emissões do Projeto Verificadas (tCO ₂ /ano)	Emissões Indiretas por Vazamento (Leakage) (tCO ₂ /ano)	Redução Verificada nas Emissões (tCO ₂ /ano)	Índice de Redução das Emissões em Relação à Linha de Base (%)	Índice de Emissões do Projeto em Relação à Linha de Base (%)	Emissões de CO ₂ associadas ao Transporte (tCO ₂ /ano)	Aproveitamento do Biogás (adm)	Aproveitamento dos Resíduos de Biomassa (adm)	Potencial de Economia Circular (grau)	Risco de Impacto sobre Ecossistemas e Biodiversidade (adm)
ALFA	-1	-2	1	1	1	-2	Qualitativo	Qualitativo	Qualitativo	Qualitativo
Projeto A (Biomassa)	0	0	0,4958	1	0,0713	0	1	1	0,8064	0
Projeto B (Biogás)	0,8161	0,5519	0,0053	0	0	0,6277	0,8898	0,4591	1	0,1209
Projeto C (Solar)	1	1	0	0,3687	1	1	-	-	0	0,2363
Projeto D (Eólico)	1	1	1	0,9804	1	1	-	-	0	0,2363
Projeto E (Hidrogênio)	1	1	0,0122	0,7241	1	1	-	-	0,1720	1

V(.)	MONITORAMENTO, RELATO, VERIFICAÇÃO (MRV)			ROBUSTEZ METODOLÓGICA E MERCADO DE CARBONO		ECONÔMICO	
	Monitoramento e Verificação das Emissões (adm)	Índice das Emissões Verificadas em relação às Emissões Estimadas no PDD (%)	Índice de Redução das Emissões Verificadas em relação às Reduções Estimadas no PDD (%)	Maturidade da Metodologia de Certificação (adm)	Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário (adm)	Taxa de Retorno Econômico dos Créditos de Carbono (adm)	Taxa Interna de Retorno (TIR) do Projeto (%)
ALFA	Qualitativo	1	1	Qualitativo	Qualitativo	2	-1
Projeto A (Biomassa)	0,2314	0,1110	1	1	0,3911	1	1
Projeto B (Biogás)	0,4800	0	0	1	1	0,4250	0,8193
Projeto C (Solar)	0	1	0,3310	1	0,3911	0,0859	0,1610
Projeto D (Eólico)	0,4800	1	0,8827	1	0,3911	0,1748	0,3767
Projeto E (Hidrogênio)	1	1	0,6531	0,3587	0	0	0

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Observa-se que todos os desempenhos são representados em uma escala comum de preferência, variando entre 0 e 1, em que valores mais próximos de 1 indicam melhor desempenho no respectivo critério, ao contrário da matriz de consequência, em que cada critério estava em suas unidades de medida originais. Para os critérios qualitativos a função de valor de cada critério para cada projeto é calculada através da normalização não proporcional dos autovetores para cada nível de impacto do critério, conforme a Equação (7). Para cada critério qualitativo é calculada a função de valor através do julgamento de preferência do decisor entre cada nível de impacto da linha em relação ao nível de impacto da coluna.

As Figura 29, Figura 30 e Figura 31 mostram o julgamento de preferência do decisor para os níveis de impacto dos critérios qualitativos “Grau de Impacto na Transformação Energética do cenário de Linha de Base”, “Fonte Energética para Produção de Hidrogênio na Linha de Base do Projeto” e “Aproveitamento do Biogás”, respectivamente.

Figura 29 – Função de Valor v(.) do Critério Qualitativo: Grau de Impacto na Transformação Energética do Cenário de Linha de Base (adm)

	N1	N2	N3	N4	N5	Autovetor	Norma	V(.)
N1	1	3	5	5	7	3,4997	0,4879	1
N2	0,3333	1	1	5	7	1,6345	0,2279	0,4230
N3	0,2	1	1	3	5	1,2457	0,1737	0,3027
N4	0,2	0,2	0,3333	1	3	0,5253	0,0732	0,0799
N5	0,1429	0,1429	0,2	0,3333	1	0,2671	0,0372	0
SOMA	1,8762	5,3429	7,5333	14,3333	23	7,1724	1	
Autovalor Máx	5,3479							
CR	7,77%							

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Figura 30 – Função de Valor v(.) do Critério Qualitativo: Fonte Energética para Produção de Hidrogênio na Linha de Base do Projeto

	N1	N2	N3	N4	N5	Autovetor	Norma	V(.)
N1	1	3	3	5	5	2,9542	0,4689	1
N2	0,3333	1	1	3	3	1,2457	0,1977	0,3376
N3	0,3333	1	1	1	3	1,0000	0,1587	0,2424
N4	0,2	0,3333	1	1	3	0,7248	0,1151	0,1356
N5	0,2	0,3333	0,3333	0,3333	1	0,3749	0,0595	0
SOMA	2,0667	5,6667	6,3333	10,3333	15	6,2996	1	
Autovalor Máx	5,1767							
CR	3,94%							

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Figura 31 – Função de Valor v(.) do Critério Qualitativo: Aproveitamento do Biogás

	N1	N2	N3	N4	N5	Autovetor	Norma	V(.)
N1	1	1	1	5	7	2,0362	0,3143	1
N2	1	1	1	3	7	1,8384	0,2838	0,8898
N3	1	1	1	3	5	1,7188	0,2653	0,8232
N4	0,2	0,3333	0,3333	1	5	0,6444	0,0995	0,2246
N5	0,1429	0,1429	0,2	0,2	1	0,2412	0,0372	0
SOMA	3,3429	3,4762	3,5333	12,2000	25	6,4789	1	
Autovalor Máx	5,1184							
CR	2,64%							

Fonte: Elaboração Própria (2026).

As Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35 mostram o julgamento de preferência do decisor para os níveis de impacto dos critérios qualitativos:

“Aproveitamento dos Resíduos de Biomassa”, “Potencial de Economia Circular”, “Risco de Impacto sobre Ecossistemas e Biodiversidade” e “Monitoramento e Verificação das Emissões”, respectivamente. Os Coeficientes de Racionalidade (CR) calculados para os quatro critérios estão abaixo do limite de 10%, indicando consistência nas preferências julgadas pelo decisor.

Figura 32 – Função de Valor $v(.)$ do Critério Qualitativo: Aproveitamento dos Resíduos de Biomassa

	N1	N2	N3	N4	Autovetor	Norma	V(.)
N1	1	3	7	9	3,7078	0,5824	1
N2	0,3333	1	5	7	1,8481	0,2903	0,4591
N3	0,1429	0,2	1	3	0,5411	0,0850	0,0789
N4	0,1111	0,1429	0,3333	1	0,2697	0,0424	0
SOMA	1,5873	4,3429	13,3333	20	6,3667	1	
Autovalor Máx	4,1654						
CR	6,13%						

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Figura 33 – Função de Valor $v(.)$ do Critério Qualitativo: Potencial de Economia Circular

	N1	N2	N3	N4	Autovetor	Norma	V(.)
N1	1	1	5	9	2,5900	0,4569	1
N2	1	1	3	7	2,1407	0,3776	0,8064
N3	0,2	0,3333	1	3	0,6687	0,1180	0,1720
N4	0,1111	0,1429	0,3333	1	0,2697	0,0476	0
SOMA	2,3111	2,4762	9,3333	20	5,6692	1	
Autovalor Máx	4,0433						
CR	1,60%						

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Figura 34 – Função de Valor $v(.)$ do Critério Qualitativo: Risco de Impacto sobre Ecossistemas e Biodiversidade

	N1	N2	N3	N4	Autovetor	Norma	V(.)
N1	1	3	3	5	2,5900	0,5331	1
N2	0,3333	1	1	3	1,0000	0,2058	0,2363
N3	0,3333	1	1	1	0,7598	0,1564	0,1209
N4	0,2	0,3333	1	1	0,5081	0,1046	0
SOMA	1,8667	5,3333	6	10	4,8580	1	
Autovalor Máx	4,0775						
CR	2,87%						

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Figura 35 – Função de Valor v(.) do Critério Qualitativo: Monitoramento e Verificação das Emissões

	N1	N2	N3	N4	Autovetor	Norma	V(.)
N1	1	3	3	7	2,8173	0,5168	1
N2	0,3333	1	3	5	1,4953	0,2743	0,4800
N3	0,3333	0,3333	1	5	0,8633	0,1584	0,2314
N4	0,1429	0,2	0,2	1	0,2749	0,0504	0
SOMA	1,8095	4,5333	7,2	18	5,4509	1	
Autovalor Máx	4,2271						
CR	0,0841						

Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 36 e Figura 37 mostram o julgamento de preferências do decisor para os níveis de impacto dos critérios qualitativos: “Maturidade da metodologia de Certificação” e “Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário”, respectivamente. Os Coeficientes de Racionalidade (CR) calculados para os dois critérios estão abaixo do limite de 10%, indicando consistência nas preferências julgadas pelo decisor.

Figura 36 – Função de Valor v(.) do Critério Qualitativo: Maturidade da Metodologia de Certificação

	N1	N2	N3	Autovetor	Norma	V(.)
N1	1	3	7	2,7589	0,6491	1
N2	0,3333	1	5	1,1856	0,2790	0,3587
N3	0,1429	0,2	1	0,3057	0,0719	0,0000
SOMA	1,4762	4,2	13	4,2503	1	
Autovalor Máx	3,0649					
CR	5,59%					

Fonte: Elaboração Própria (2026).

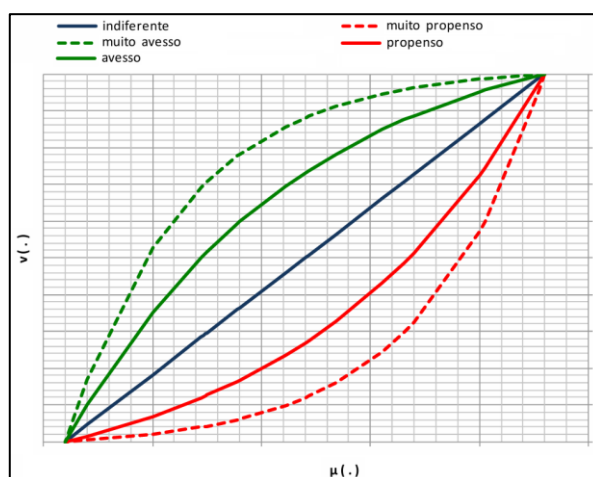
Figura 37 – Função de Valor v(.) do Critério Qualitativo: Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário

	N1	N2	N3	Autovetor	Norma	V(.)
N1	1	3	9	3,0000	0,6554	1
N2	0,3333	1	7	1,3264	0,2897	0,3911
N3	0,1111	0,1429	1	0,2513	0,0549	0,0000
SOMA	1,4444	4,1429	17	4,5777	1	
Autovalor Máx	3,0803					
CR	6,92%					

Fonte: Elaboração Própria (2026).

As curvas de função valor obtidas pelo método MAUT serão contínuas e apresentarão comportamento determinado à ex-ante pelo decisor, através da atribuição de um coeficiente de propensão/aversão “ α ”. Caso o decisor atribua $\alpha > 0$, o comportamento será propenso ou muito propenso; caso atribua $\alpha < 0$, o comportamento será avesso ou muito avesso; por fim, caso atribua $\alpha = 0$, o comportamento será indiferente, conforme Figura 38.

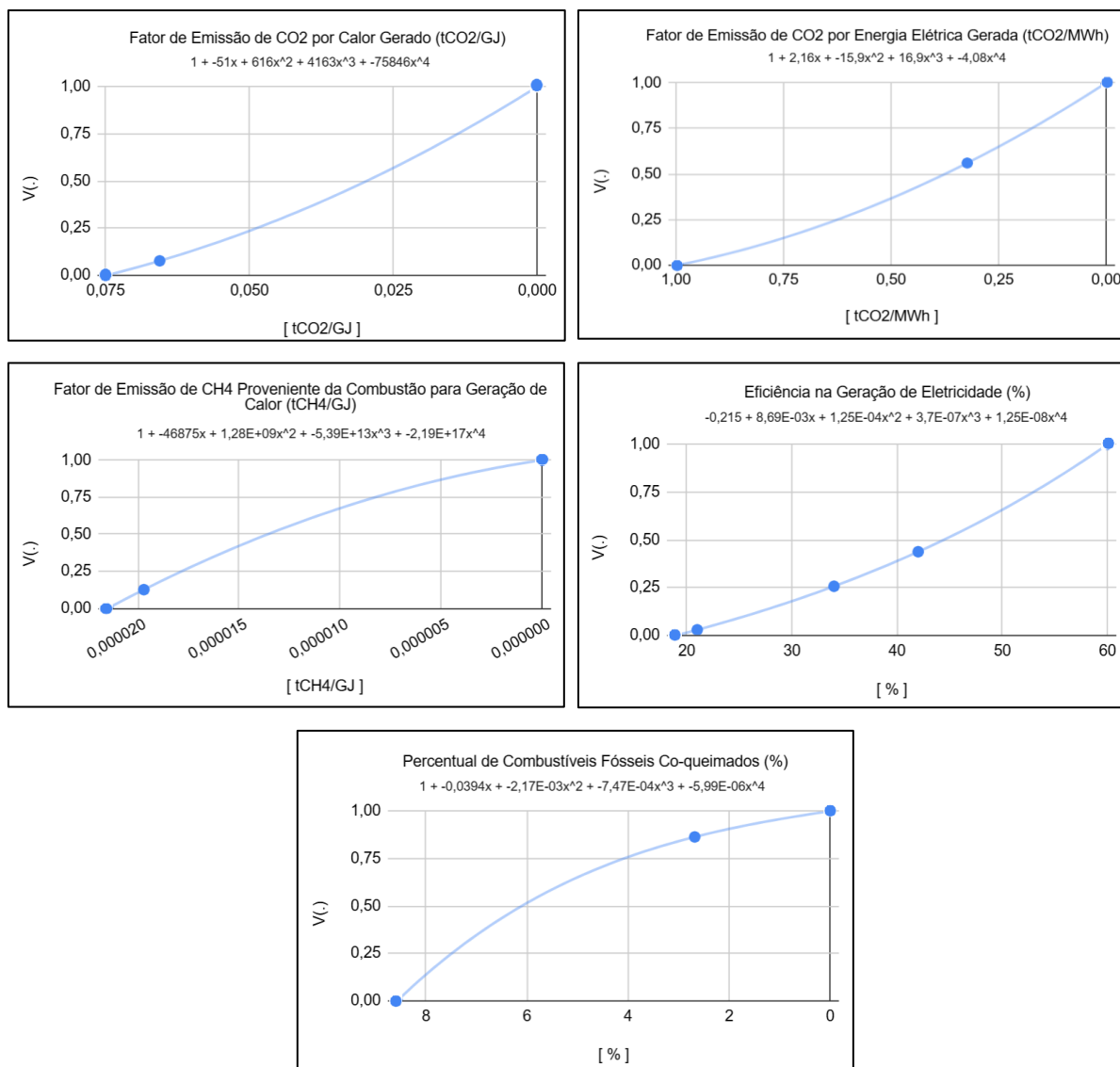
Figura 38 – Comportamento das Curvas de Propensão, Aversão e Indiferença



Fonte: Adaptado de Sica *et al.* (2010).

A Figura 39 apresenta o comportamento da função valor contínua para os critérios do PVF Técnico pelo método MAUT. O decisor atribuiu $\alpha = 1$ (propenso) para os critérios: “O Fator de emissão de CO_2 por Calor Gerado”, “Fator de emissão de CO_2 por Energia Elétrica Gerada” e “Eficiência na Geração de Qualidade”. Devido ao $\alpha = 1$ (propenso), o decisor tem propensão ao melhor desempenho possível, ou seja, ele deseja se aproximar dos melhores desempenhos possíveis. Já, as funções dos critérios “Fator de emissão CH_4 proveniente da combustão para geração de energia” com $\alpha = -1$ (avesso) e “Percentual de combustíveis fósseis co-queimados” com $\alpha = -2$ (muito avesso), indicam que o decisor tem aversão aos piores resultados, ou seja, ele deseja se afastar dos piores resultados aceitáveis.

Figura 39 – Curvas de Valor Econômico $v(.)$ dos Projetos sob o PVF Técnico



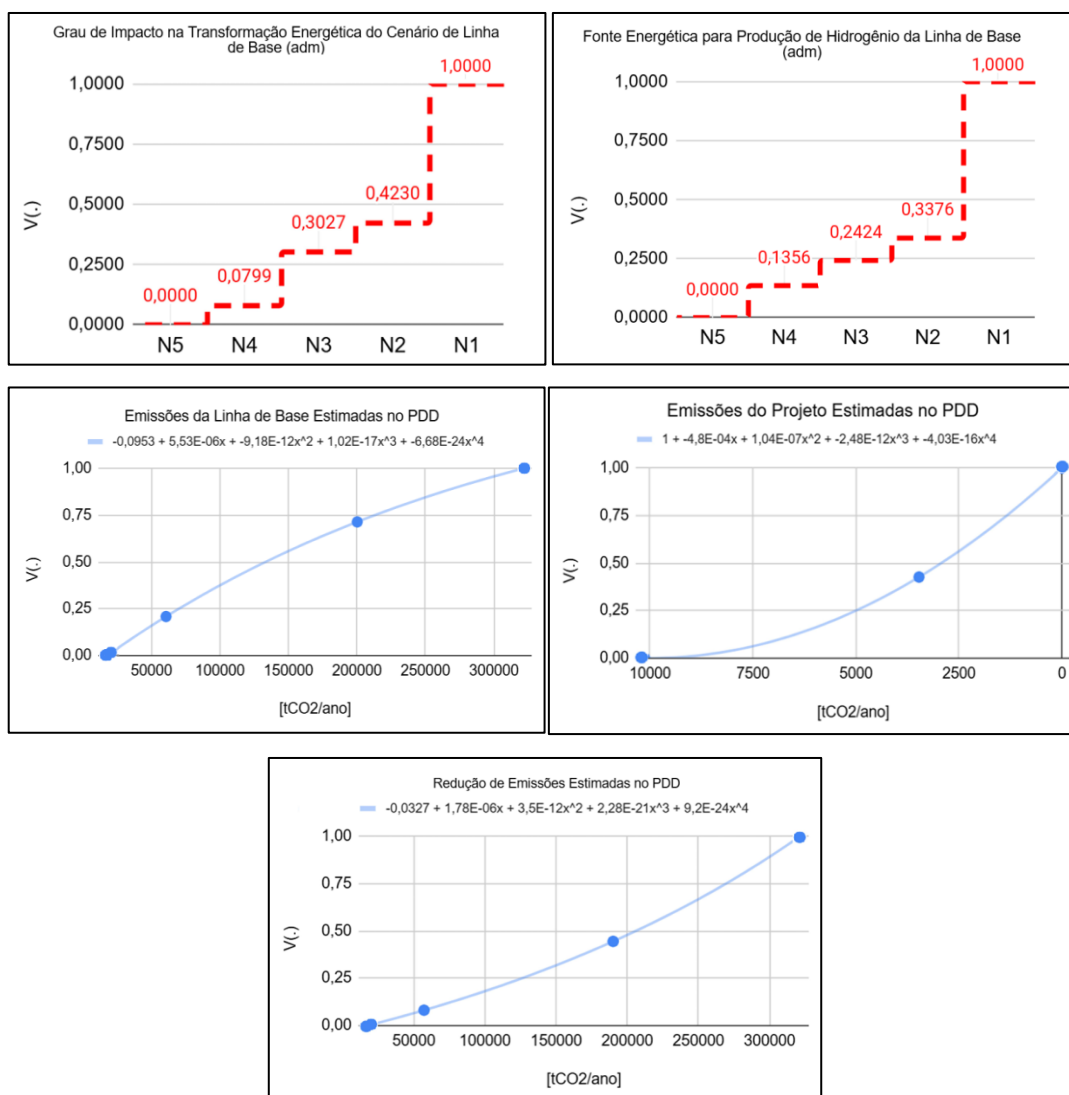
Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 40 apresenta as funções de valor dos critérios do PVF Linha de Base. Para os critérios qualitativos “Grau de impacto na transformação energética do cenário de linha de base” e “Fonte Energética para produção do hidrogênio da linha de base” utilizou-se o método AHP para estabelecer o julgamento das preferências do decisor para os níveis de impacto do critério. Ao final do julgamento paritário dos níveis de impacto, ambas as funções ilustraram que o comportamento econômico do decisor é de propensão, em que o decisor busca aproximar-se dos melhores desempenhos possíveis.

Para os critérios “Emissões do projeto estimadas no PDD”, e “Fonte energética para produção de hidrogênio da linha de base” o decisor atribuiu os

coeficientes de propensão $\alpha = 2$ e $\alpha = 1$, respectivamente, o que significa que o decisor considerou à *ex-ante* que o seu comportamento econômico para os critérios é de propensão, e portanto, busca se aproximar dos melhores desempenhos possíveis. Para o critério “Emissões da Linha de Base Estimadas no PDD” o decisor atribuiu $\alpha = -1$, sendo portanto, avesso ao pior resultado aceitável.

Figura 40 – Curvas de Valor Econômico $v(.)$ dos Projetos sob o PVF Linha de Base

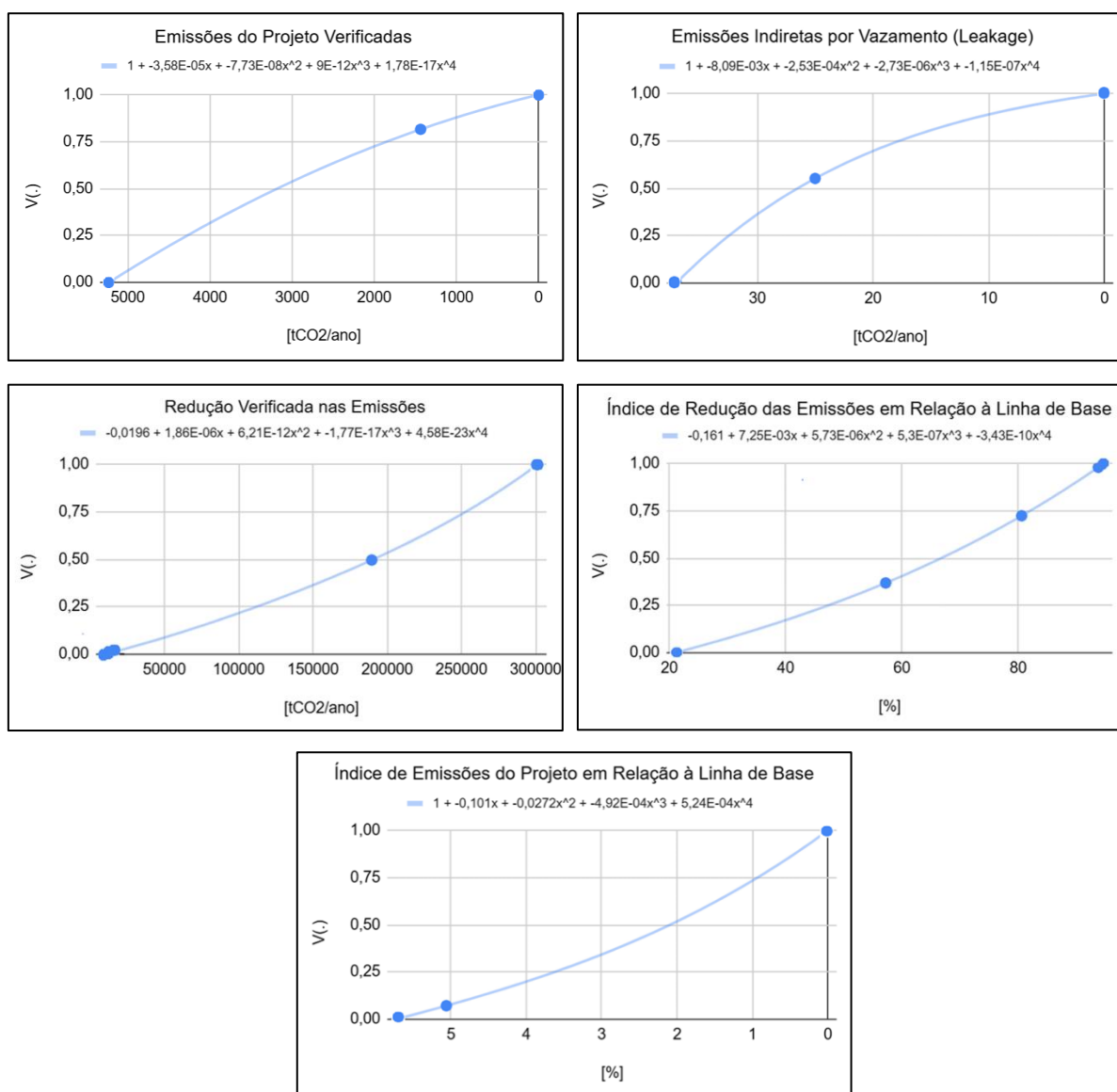


Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 41 contempla as funções valor dos critérios do PVF Adicionalidade. Os cinco critérios são quantitativos, contínuos e com o comportamento formado à *ex-ante* pelo decisor ao atribuir coeficientes de propensão/aversão pela técnica MAUT. Para os critérios “Emissões do projeto verificadas” e “Emissões indiretas por vazamento” o decisor atribuiu $\alpha = -1$ e $\alpha = -2$, respectivamente, o que significa que o decisor considerou à *ex-ante* que o seu

comportamento econômico para os critérios seria de aversão aos piores resultados aceitáveis. Para os critérios “Redução verificada nas emissões”, “Índice das emissões em relação à linha de base” e “Índice de emissões do projeto em relação à linha de base”, o decisor atribuiu $\alpha = 1$, indicando que ele tem um comportamento econômico propenso ao melhor desempenho possível, buscando se aproximar dos melhores resultados possíveis.

Figura 41 – Curvas de Valor Econômico $v(.)$ dos Projetos sob o PVF Adicionalidade



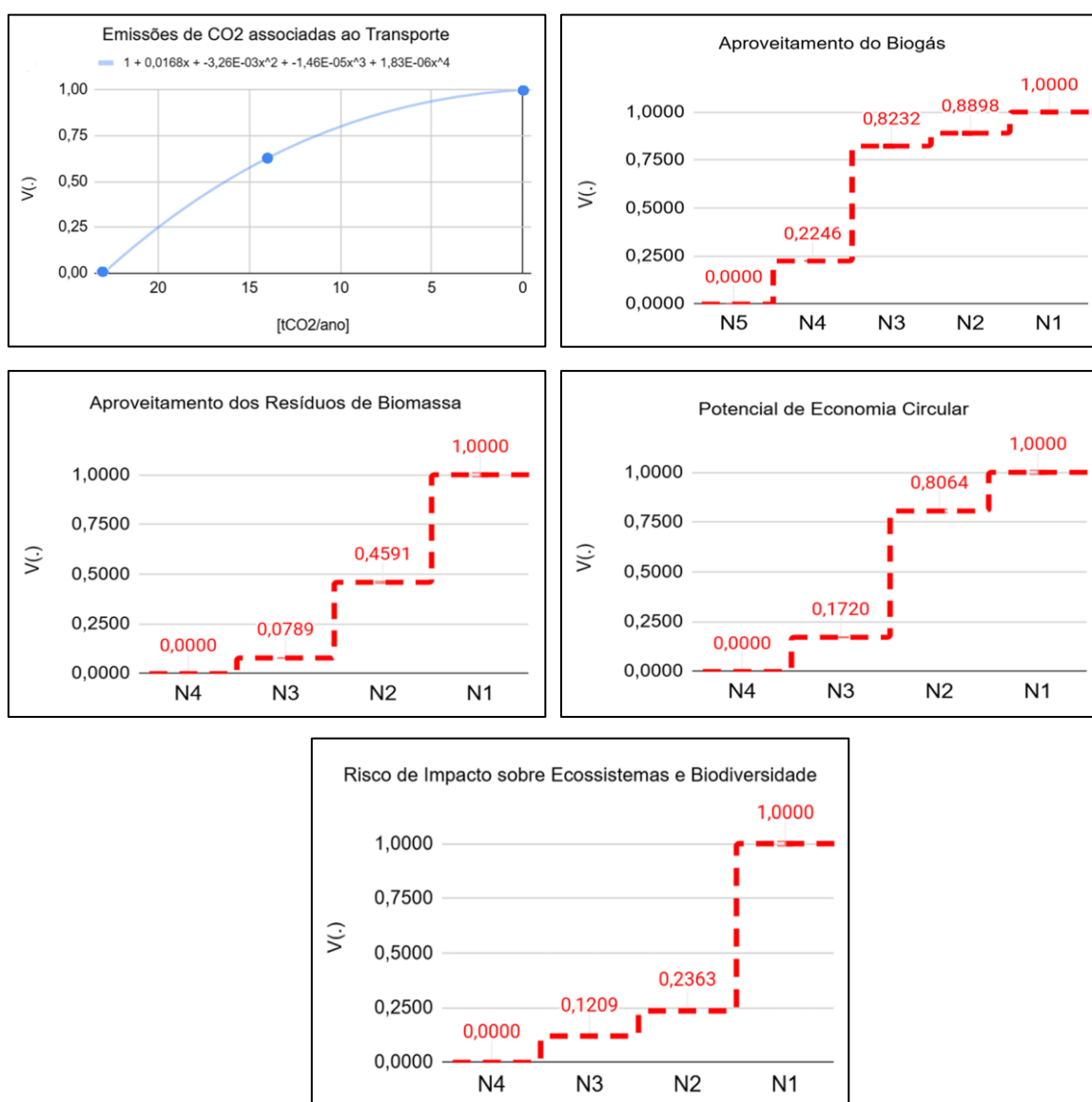
Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 42 apresenta as funções de valor dos critérios do PVF Ambiental. O critério “Emissões de CO₂ associadas ao transporte” é contínuo e foi construído pelo método MAUT. O decisor atribuiu $\alpha = -2$, o que significa que o decisor considerou à *ex-ante* que o seu comportamento econômico para os critérios

seria de muito avesso ao pior resultado aceitável, ou seja, deseja-se afastar dos piores desempenhos aceitáveis.

Os demais critérios são discretos e tomados pelo decisor através do julgamento paritário dos níveis de impacto pelo método AHP. Os critérios “Aproveitamento do Biogás” e “Potencial de Economia Circular” tem comportamento econômico avesso, enquanto os critérios “Aproveitamento dos resíduos de biomassa” e “Risco de impacto sobre ecossistemas e biodiversidade” apresentam comportamento econômico propenso.

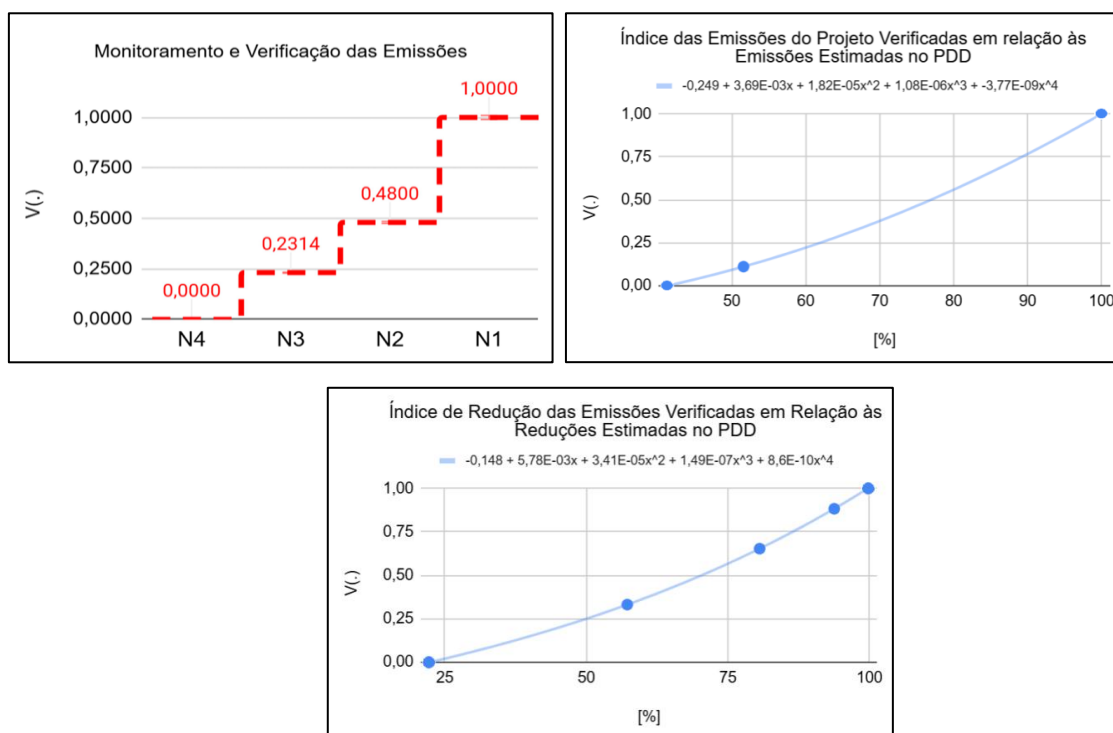
Figura 42 – Curvas de Valor Econômico $v(.)$ dos Projetos sob o PVF Ambiental



Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 43 apresenta funções de valor dos critérios do PVF Monitoramento, Relato e Verificação (MRV). O critério “Monitoramento e verificação das emissões” teve sua curva de função valor determinada através do julgamento de preferência entre os níveis de impacto pelo decisor através do método AHP, dessa forma, o comportamento do decisor foi tomado à *ex-post* e tem comportamento propenso, uma vez que, o decisor é propenso a se aproximar dos melhores desempenhos possíveis. Já, os demais critérios são contínuos e construídos pelo método MAUT e foram atribuídos $\alpha = 1$, e portanto, são propensos.

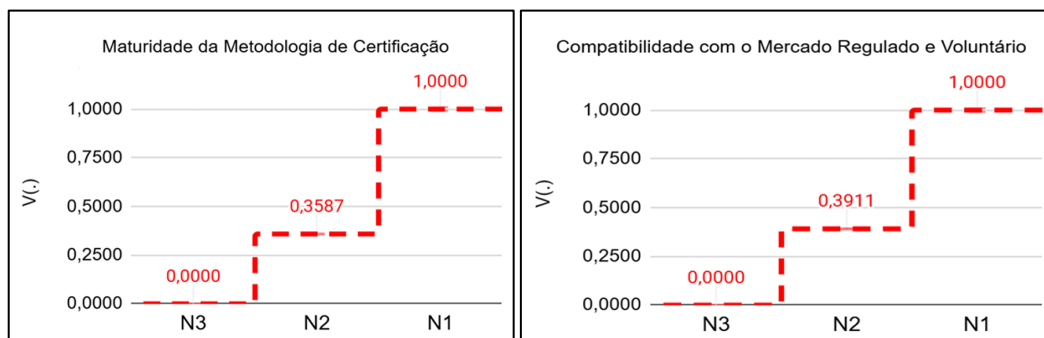
Figura 43 – Curvas de Valor Econômico $v(.)$ dos Projetos sob o PVF Monitoramento, Verificação, Relato



Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 44 apresenta as funções de valor dos critérios do PVF Robustez Metodológica e Mercado Carbono. Ambos os critérios são qualitativos, discretos e foram obtidos seus desempenhos de função valor através do julgamento paritário dos níveis de impacto pelo decisor através do método AHP. Ao final do julgamento, o decisor apresentou comportamento econômico propenso para ambos os critérios, indicando que o decisor é propenso ao melhor desempenho possível, ou seja, tem o desejo de se aproximar dos melhores resultados possíveis.

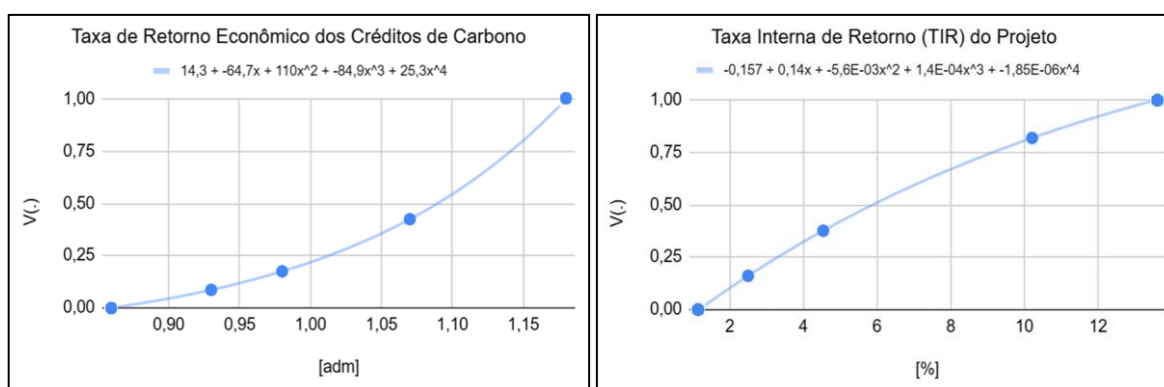
Figura 44 – Curvas de Valor Econômico $V(.)$ dos Projetos sob o PVF Robustez Metodológica e Mercado de Carbono



Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 45 apresenta as curvas de função de valor dos critérios do PVF Econômico. Ambos os critérios são quantitativos, descritos por função contínua através da aplicação do Método MAUT. Para o critério “Taxa de Retorno Econômico dos Créditos de Carbono” foi atribuído $\alpha = 2$, o que significa que o decisor considerou à *ex-ante* que o seu comportamento econômico para o critério seria de muito propenso ao melhor resultado possível, ou seja, deseja-se aproximar dos melhores desempenhos possíveis. Diferentemente do comportamento que o decisor atribuiu ao critério “Taxa interna de Retorno (TIR) do Projeto”, pois ao atribuir um coeficiente $\alpha = -1$, o decisor formou seu comportamento à *ex-ante* como avesso aos piores desempenhos aceitáveis, desejando afastar-se dessas alternativas.

Figura 45 – Curvas de Valor Econômico $v(.)$ dos Projetos sob o PVF Econômico



Fonte: Elaboração Própria (2026).

5.6 Agregação Aditiva

O valor global de uma alternativa é calculado através da fórmula de agregação aditiva, obtido a partir dos desempenhos da alternativa em cada um dos critérios do modelo e ponderadas pela importância global de cada critério, chamados de *trade-offs* globais, conforme Equação (17).

Esse procedimento permite integrar os desempenhos locais de cada alternativa em uma única medida de desempenho global, considerando simultaneamente todos os critérios do modelo e suas respectivas importâncias relativas. A Figura 46 apresenta os valores globais obtidos para os cinco projetos avaliados.

Figura 46 – Valor Global Agregação Aditiva dos Projetos

Alternativas	VALOR GLOBAL ADITIVO
PROJETO A	0,47518
PROJETO B	0,42097
PROJETO C	0,38699
PROJETO D	0,70668
PROJETO E	0,48735

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que o Projeto D (Eólico) apresentou o melhor desempenho global dentre as alternativas de projetos analisadas, alcançando valor de 0,70668. Esse resultado indica que, considerando simultaneamente os todos os critérios dos 7 PVFs que compõem o modelo, o projeto eólico foi a alternativa que apresentou o melhor desempenho global. Observa-se ainda que os Projetos E (Hidrogênio Verde) e A (Biomassa) apresentaram desempenhos intermediários e relativamente próximos entre si, com valores globais de 0,48735 e 0,47518, respectivamente. O Projeto B (Biogás) obteve valor global de 0,42097, enquanto o Projeto C (Solar Fotovoltaica) apresentou o menor desempenho global dentre as alternativas avaliadas, com valor de 0,38699.

Na Figura 47 é apresentada a diferença absoluta e percentual entre o projeto com melhor desempenho global (Projeto D) e os demais projetos. A diferença para o segundo melhor colocado é de 0,21934, o que equivale a uma diferença percentual de 31,04%, enquanto a diferença do Projeto D para o projeto com pior

desempenho (Projeto C) é de 0,31969, o que equivale a uma diferença de 45,24%. As diferenças calculadas em relação ao melhor projeto demonstram que o Projeto D manteve uma vantagem expressiva sobre todos os demais projetos, inclusive em relação ao segundo colocado. Esse resultado reforça a consistência da classificação do Projeto D, que é sustentada por um desempenho global superior e não por diferenças marginais entre as alternativas.

Figura 47 – Diferença Relativa para o Melhor Projeto

Alternativas	Valor Global	Diferença Absoluta para Melhor Alternativa	Diferença Percentual para Melhor Alternativa
PROJETO A	0,47518	0,23151	32,76%
PROJETO B	0,42097	0,28571	40,43%
PROJETO C	0,38699	0,31969	45,24%
PROJETO D	0,70668	0,00000	0,00%
PROJETO E	0,48735	0,21934	31,04%

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Uma das explicações para o desempenho superior do Projeto D está no elevado desempenho obtido em descritores com alta importância relativa (trade-off), os quais exercem maior influência sobre o resultado final. Isso evidencia um dos aspectos mais importantes da análise multicritério: o adequado estabelecimento dos critérios de avaliação, uma vez que eles podem influenciar positiva ou negativamente o desempenho dos projetos. Além dos critérios, a definição dos decisores e dos demais parâmetros do modelo também exerce papel fundamental na avaliação. O Projeto D ainda apresentou desempenho consistente ao longo dos diferentes descritores avaliados, sem deficiências significativas nos critérios considerados. A Figura 48 apresenta alguns dos descritores com elevado trade-off em que o Projeto D alcançou desempenho máximo em relação às demais alternativas.

Figura 48 – Descritores com Alto Desempenho no Projeto D

PROJETO D (EÓLICO)	TÉCNICO	LINHA DE BASE		ADICIONALIDADE	AMBIENTAL
	Fator de Emissão de CO ₂ por Energia Elétrica Gerada (tCO ₂ /MWh)	Emissões da Linha de Base Estimadas no PDD (tCO ₂ /ano)	Redução das Emissões Estimadas no PDD (tCO ₂ /ano)	Redução Verificada nas Emissões (tCO ₂ /ano)	Emissões de CO ₂ associadas ao Transporte (tCO ₂ /ano)
Função Valor V(.)	1	1	1	1	1
Trade-off global	4,82%	7,71%	4,97%	7,84%	5,89%

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Embora a agregação aditiva indique o Projeto D como a alternativa de melhor desempenho global, torna-se importante avaliar a robustez dessa solução frente a possíveis variações nas preferências do decisor. Dessa forma, na próxima seção será realizada uma análise de sensibilidade, com o objetivo de verificar a estabilidade da alternativa selecionada e identificar o nível de variação necessário para alterar a ordenação final dos projetos.

5.7 Análise de Sensibilidade

O objetivo é avaliar até que ponto a alternativa selecionada permanece como a melhor opção diante de alterações em seus parâmetros (Ensslin; Neto; Noronha, 2001). A análise de sensibilidade consiste em variar, em termos percentuais, o *trade-off* do critério de maior impacto, até que a segunda melhor alternativa se torne a melhor. A robustez da solução se encontra na estabilidade da alternativa mediante variações percentuais no *trade-off* do critério de maior impacto.

Primeiro, é necessário determinar qual o critério de maior impacto entre a melhor alternativa e segunda melhor alternativa. Obtido pelas contribuições calculadas de cada critério. As contribuições de cada critério são determinadas na diferença entre o valor econômico da segunda melhor alternativa e o valor econômico da melhor alternativa para cada critério, ponderadas pelo respectivo *trade-off* global do critério, conforme Equação (30).

$$g_i = (v_i(a_{n-1}) - v_i(a^*)) \times w_i \quad (30)$$

Em que, g_i é a contribuição (impacto) do critério i ; $v_i(a_{n-1})$ é o valor econômico do critério i da segunda melhor alternativa; $v_i(a^*)$ é o valor econômico do critério i da melhor alternativa a^* ; e w_i é o *trade-off* global do critério i .

A determinação do critério de maior impacto entre a segunda melhor alternativa (Projeto E) e a melhor alternativa (Projeto D) é mostrado na Figura 49, mediante aplicação da Equação (30) para cada um dos critérios que compõem o modelo multicriterial.

Figura 49 – Critério de Maior Impacto entre a Segunda Melhor Alternativa e a Melhor Alternativa

PVF	TÉCNICO					LINHA DE BASE				
Trade-off Global	1,81%	4,82%	1,81%	0,68%	1,81%	2,10%	1,08%	7,71%	2,32%	4,97%
Alternativas	Fator de Emissão de CO2 por Calor Gerado	Fator de Emissão de CO2 por Energia Elétrica Gerada	Fator de Emissão de CH4 Proveniente de Combustão para Geração de Calor	Eficiência de Geração de Eletricidade	Percentual de Combustíveis Fósseis Co-queimados	Grau de Impacto na Transformação Energética do Cenário de Linha de Base	Fonte Energética para Produção de Hidrogênio na Linha de Base do Projeto	Emissões da Linha de Base Estimadas no PDD	Emissões do Projeto Estimadas no PDD	Redução das Emissões Estimadas no PDD
PROJETO D	1	1	1	0	1	0	-	1	1	1
PROJETO E	1	1	1	1	1	0,3027	0,3376	0,0122	1	0,0045
CRITÉRIO DE MAIOR IMPACTO										
Contribuição	0	0	0	0,0038	0	0,0047	NA	-0,0762	0	-0,0495

PVF	ADICIONALIDADE					AMBIENTAL				
Trade-off Global	2,94%	0,90%	7,84%	3,25%	3,25%	5,89%	0,93%	0,93%	2,49%	2,49%
Alternativas	Emissões do Projeto Verificadas	Emissões Indiretas por Vazamento	Redução de Emissões Verificadas	Índice de Redução das Emissões em Relação à Linha de Base	Índice de Emissões do Projeto em Relação à Linha de Base	Emissões de CO2 associadas ao Transporte	Aproveitamento do Biogás	Aproveitamento dos Resíduos de Biomassa	Potencial de Economia Circular (grau)	Risco de Impacto sobre Ecossistemas e Biodiversidade (adm)
PROJETO D	1	1	1	1	1	1	-	-	0	0,2363
PROJETO E	1	1	0,0122	0,7241	1	1	-	-	0,1720	1
CRITÉRIO DE MAIOR IMPACTO										
Contribuição	0	0	-0,0774	-0,0083	0	0	NA	NA	0,0043	0,0190

PVF	MONITORAMENTO, RELATO, VERIFICAÇÃO			ROBUSTEZ METODOLÓGICA E MERCADO DE CARBONO		ECONÔMICO	
Trade-off Global	10,42%	1,71%	4,23%	3,18%	9,55%	5,45%	5,45%
Alternativas	Monitoramento e Verificação das Emissões	Índice das Emissões do Projeto Verificadas em relação às Emissões Estimadas no PDD	Índice de Redução das Emissões Verificadas em relação às Reduções Estimadas no PDD	Maturidade da Metodologia de Certificação (adm)	Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário (adm)	Taxa de Retorno Econômico dos Créditos de Carbono	Taxa Interna de Retorno (TIR) do Projeto
PROJETO D	0,4800	1	1	1	0,3911	0,1748	0,3767
PROJETO E	1	1	0,6531	0,3587	0	0	0,0000
CRITÉRIO DE MAIOR IMPACTO							
Contribuição	0,0542	0	-0,0097	-0,0204	-0,0373	-0,0095	-0,0205

Fonte: Elaboração Própria (2026).

A análise de contribuição entre as duas alternativas resultou na determinação do critério “Monitoramento e Verificação de Emissões” como o de maior impacto, com uma contribuição de 0,0542. Após identificação do critério de maior impacto, procede-se com a variação percentual do *trade-off* deste critério até que a segunda melhor alternativa se torne a melhor.

$$w_i^{novo} = w_i \times (1 + tx) \quad (31)$$

Em que:

w_i^{novo} é o novo *trade-off* global do critério de maior impacto; tx é a taxa de variação percentual; e w_i é o antigo *trade-off* global do critério de maior impacto i.

A variação no *trade-off* do critério de maior impacto afetará o *trade-off* dos demais critérios do modelo, pois segundo Ensslin, Neto e Noronha (2001) alterar uma taxa de substituição (*trade-off*) de um dos critérios afeta todas as demais taxas

PVF	MONITORAMENTO, RELATO, VERIFICAÇÃO			ROBUSTEZ METODOLÓGICA E MERCADO DE CARBONO		ECONÔMICO	
Antigo Trade-off Global	10,42%	1,71%	4,23%	3,18%	9,55%	5,45%	5,45%
Alternativas	Monitoramento e Verificação das Emissões	Índice das Emissões do Projeto Verificadas em relação às Emissões Estimadas no PDD	Índice de Redução das Emissões Verificadas em relação às Reduções Estimadas no PDD	Maturidade da Metodologia de Certificação (adm)	Compatibilidade com o Mercado Regulado e Voluntário (adm)	Taxa de Retorno Econômico dos Créditos de Carbono	Taxa Interna de Retorno (TIR) do Projeto
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE							
Novo Trade-off Global	40,34%	1,14%	2,81%	2,12%	6,36%	3,63%	3,63%
Taxa de variação	287%						

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Figura 51 – Novo Valor Econômico Global das Melhores Alternativas

Valor Global	Original	Modificado
PROJETO D	0,70668	0,63099
PROJETO E	0,48735	0,63155

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Os resultados indicaram que o projeto D permaneceu como a melhor alternativa e robusta, até uma variação de 287% no *trade-off* do critério de maior impacto: “Monitoramento e Verificação de Emissões”. A partir desse ponto, o Projeto E passou a apresentar desempenho global superior, tornando-se a alternativa mais bem avaliada pelo modelo. Com a aplicação dessa variação, o valor global do Projeto E aumentou de 0,48735 para 0,63155, enquanto o valor global do Projeto D foi reduzido de 0,70668 para 0,63099, como pode ser visto na Figura 51.

Observa-se ainda que a variação necessária para alterar a classificação das alternativas foi expressiva. O *trade-off* global do critério “Monitoramento e Verificação das Emissões” passou de seu valor original de 10,42% para 40,34%, representando um aumento de 287% em relação ao *trade-off* inicialmente atribuído.

Ao final da análise de sensibilidade, constatou-se que o Projeto D é a melhor alternativa e robusta até uma variação de 287% sobre o *trade-off* do critério de maior impacto. Esse resultado evidencia que a alternativa selecionada pelo modelo apresenta elevado grau de robustez, uma vez que seriam necessárias mudanças substanciais nas preferências do decisor para que outra alternativa assumisse a primeira posição no *ranking*.

5.8 Considerações

O Capítulo 5 apresentou a aplicação prática do modelo multicriterial desenvolvido ao longo deste trabalho, por meio da avaliação de cinco projetos de geração de energia a partir de fontes renováveis. Inicialmente, foram descritos os projetos selecionados e suas principais características técnicas e metodológicas, garantindo a contextualização das alternativas.

Em seguida, foram calculados os *trade-offs* dos descritores e dos Pontos de Vista Fundamentais (PVFs), bem como o *trade-off* global dos critérios, permitindo a incorporação das preferências do decisor ao modelo. Posteriormente, foram construídas a matriz de consequência, a matriz de indiferença e a matriz de valor econômico, que possibilitou a transformação dos dados originais em uma escala de valor comum entre os critérios.

Com base nesses resultados, foi realizada a agregação aditiva, que permitiu a obtenção do desempenho global projeto e a sua ordenação segundo o modelo proposto. Por fim, a análise de sensibilidade evidenciou a robustez da solução encontrada, ao avaliar a estabilidade da alternativa de melhor desempenho frente a variações de *trade-off* no critério de maior impacto. Dessa forma, o capítulo consolida a operacionalização do modelo e demonstra sua aplicabilidade como ferramenta de apoio à decisão na avaliação integrada de projetos de crédito de carbono.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver e aplicar um modelo multicriterial de apoio à decisão para a avaliação integrada de projetos de crédito de carbono associados a diferentes fontes de energia renovável. O estudo foi fundamentado no contexto do Acordo de Paris e na dinâmica dos mercados de carbono regulado e voluntário, os quais se consolidam como instrumentos centrais para a mitigação das emissões de GEE e para a transição energética global.

A partir da revisão teórica, foram apresentadas as bases conceituais relacionadas aos mercados de carbono e aos principais mecanismos de certificação de reduções de emissões. Em seguida, foram apresentados os métodos de apoio à decisão, incluindo AHP, MAUT e *Direct Rating*, além dos procedimentos de definição de funções de valor, *trade-offs* e agregação aditiva. Os métodos permitiram construir e aplicar o modelo multicriterial.

Na etapa de modelagem e implementação, o problema foi estruturado em uma árvore de decisão composta por Pontos de Vista Fundamentais (PVFs) técnicos, ambientais, econômicos, de linha de base, adicionalidade, MRV e robustez metodológica. A partir dessa estrutura, foram definidos descritores e escalas de desempenho, permitindo a operacionalização do modelo proposto.

No estudo de caso, o modelo foi aplicado a cinco projetos de crédito de carbono associados a diferentes tecnologias de geração de energia: biomassa, biogás, solar fotovoltaica, eólica e hidrogênio verde. A aplicação dos métodos permitiu a transformação dos dados originais em funções de valor comparáveis, a agregação dos critérios por meio dos *trade-offs* e o cálculo do desempenho global das alternativas.

Os resultados obtidos pela agregação aditiva indicaram o projeto eólicoelétrico (Projeto D) como a alternativa de melhor desempenho global, com valor igual a 0,70668, seguido pelos projetos de hidrogênio (0,48735), biomassa (0,47518), biogás (0,42097) e solar fotovoltaica (0,38699). A análise de sensibilidade demonstrou ainda a robustez dessa solução, uma vez que o projeto eólicoelétrico manteve-se como a melhor alternativa mesmo sob variações de 287% no *trade-off*

critério de maior impacto, apenas sendo superado após uma variação significativa do seu peso relativo.

Dessa forma, conclui-se que o modelo multicriterial desenvolvido se mostra adequado para apoiar a tomada de decisão na avaliação de projetos de crédito de carbono, ao integrar critérios de naturezas distintas em uma mesma estrutura. Como contribuição, o trabalho oferece uma abordagem integrada para comparação de projetos no contexto da transição energética e do mercado de carbono, podendo ser adaptado para diferentes cenários e tipos de projetos.

6.1 Limitações

Apesar dos resultados obtidos, é importante destacar algumas limitações deste estudo. A primeira delas está relacionada à disponibilidade e consistência dos dados dos projetos de crédito de carbono, uma vez que nem todos os projetos analisados possuem informações completas ou atualizadas em seus documentos de registro e verificação, especialmente no contexto de transição entre o mercado regulado do MDL e o mecanismo do item 6.4 do Acordo de Paris.

Outra limitação refere-se à seleção dos projetos utilizados no estudo de caso, que foi condicionada pela disponibilidade de dados públicos. Embora, buscou-se uma representatividade de diferentes tecnologias renováveis, a amostra não necessariamente representa todo o universo de projetos existentes no mercado de carbono, o que pode influenciar a generalização dos resultados.

Além disso, a modelagem multicriterial depende diretamente dos julgamentos do decisor na definição de parâmetros como funções de valor e *trade-offs*, o que introduz subjetividade inerente ao processo. Ainda que os métodos utilizados (AHP, MAUT e *Direct Rating*) reduzam inconsistências e aumentem a transparência, diferentes decisores podem atribuir importâncias relativas (*trade-offs*) distintas aos critérios, acarretando variações nos resultados finais.

REFERÊNCIAS

ABATABLE. **VCM Investment Attractiveness Index 2024**. 2024. Disponível em: <https://abatable.com/vcm-investment-index/>. Acesso em: 18 jun. 2025.

ALVES, Lucas. L. M.; ANGELO, Humberto.; ALMEIDA, Alexandre. N.; SILVA, Gilson. F.; MATRICARDI, Eraldo. A. T.; NUNES, André.; SOUZA JÚNIOR, Celso. V. N. Strategic Analysis of the Forest Carbon Market in Brazil. **Sustainability** 2024, 16, 6898. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/16/6898>. Acesso em: 09 jun. 2025.

ANAND, C. *et al.* **Green hydrogen for a sustainable future: a review of production methods, innovations, and applications**. International Journal of Hydrogen Energy, [S.l.], v. 111, p. 319–341, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.257>. Acesso em: 06 jul. 2025.

ANE - ACADEMIA NACIONAL DE ENGENHARIA. **Mercado de carbono no Brasil**. Comitê Permanente de Energia. Rio de Janeiro: ANE, 2022. Disponível em: https://www.mackenzie.br/fileadmin/ARQUIVOS/Public/pesquisa-inovacao/ceampi/CCUS/Mercado-de-Carbono-CPEANE_2022.pdf. Acesso em: 12 maio 2025.

ASHOUR, Omar; *et al.* **A comprehensive state-of-the-art survey on the recent modified and hybrid analytic hierarchy process approaches**. *Applied Soft Computing*, Amsterdam, v. 150, art. 111014, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111014>. Acesso em: 10 abr. 2026.

BANA E COSTA, Carlos A.; STEWART, Theodor J.; VANSNICK, Jean-Claude. **Multicriteria decision analysis: Some thoughts based on the tutorial and discussion sessions of the ESIGMA meetings**. European Journal of Operational Research, Amsterdam, v. 99, n. 1, p. 28–37, 1997. DOI: 10.1016/S0377-2217(96)00380-3. Acesso em: 03 fev. 2026.

BANA E COSTA, Carlos A. **Structuration, construction et exploitation d'un modèle multicritère d'aide à la décision**. 1992. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1992.

BARROS, Talita Delgrossi; JARDINE, José Gilberto. **Biodiesel**. Embrapa – Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel>. Acesso em: 03 jul. 2025.

BELTON, Valerie; STEWART, Theodor J. **Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.

BERKELEY PUBLIC POLICY. **Voluntary Registry Offsets Database 2024**. 2024. Disponível em: <https://gspp.berkeley.edu/berkeley-carbon-trading-project/offsets-database>. Acesso em: 14 jun. 2025.

BLAUFELDER, C. *et al.* **A blueprint for scaling voluntary carbon markets to meet the climate challenge.** McKinsey & Company, 2021. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/sustainability/our%20insights/a%20blueprint%20for%20scaling%20voluntary%20carbon%20markets%20to%20meet%20the%20climate%20challenge/a-blueprint-for-scaling-voluntary-carbon-markets-to-meet-the-climate-challenge.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2025.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Projetos de carbono e outros pagamentos por serviços ambientais (PSA).** Rio de Janeiro: BNDES, 2024. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/7fae515c-8629-4407-ae30-9c5772c5aa93/Produto+3+-+Resumo+Executivo+-+BNDES_FEP+PSA_V1_150524a+1.pdf?MOD=AJPERES&CVID=o-8fzla. Acesso em: 05 maio 2025.

BRASIL. **Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024.** Dispõe sobre o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões e dá outras providências. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 11 dez. 2024. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-15.042-de-11-de-dezembro-de-2024-601124199>. Acesso em: 17 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da Fazenda. **Sancionada a lei que estabelece as bases para um mercado regulado de carbono no Brasil.** Brasília: Ministério da Fazenda, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/assuntos/noticias/2024/dezembro/Sancionada-a-lei-que-estabelece-as-bases-para-um-mercado-regulado-de-carbono-no-Brasil>. Acesso em: 03 abr. 2025.

CAVALLO, Bice; MAZUREK, Jiří; RAMÍK, Jaroslav. **A comparative study on precision of pairwise comparison matrices.** *Fuzzy Optimization and Decision Making*, Dordrecht, v. 23, n. 2, p. 179–198, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10700-023-09416-4>. Acesso em: 20 jun. 2026.

CCS BRASIL. **1º Relatório Anual de CCS no Brasil 2022/2023.** Coordenação e edição: Isabela Morbach Machado e Silva; Nathália Weber. São Paulo: CCS Brasil, 2023. Disponível em: https://www.ccsbr.com.br/_files/ugd/11a7f0_f79d8b3570e04429974fa4a67d444881.pdf. Acesso em: 15 maio 2025.

CEBDS – CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Reposicionando o Brasil na regulamentação do Artigo 6 do Acordo de Paris.** 2021. Disponível em: <https://cebds.org/publicacoes/reposicionando-o-brasil-na-regulamentacao-do-artigo-6-do-acordo-de-paris/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

CHEN, Hui; LETMATHE, Peter; SODERSTROM, Naomi. Reporting bias and monitoring in Clean Development Mechanism projects. **Contemporary Accounting Research**, Toronto, v. 38, n. 1, p. 7–31, spring 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1911-3846.12609>. Acesso em: 08 jul. 2025.

CLIMATE ACTION TRACKER – **Status Brazil: Brazil. 2025.** Disponível em: <https://climateactiontracker.org/countries/brazil/>. Acesso em: 15 jun. 2025.

ECOSYSTEM MARKETPLACE. **Global Carbon Markets Hub Data. 2024.** Disponível em: <https://hub.ecosystemmarketplace.com/landing>. Acesso em: 20 jun. 2025.

ECOSYSTEM MARKETPLACE. **EM Carbon Project Taxonomy Hub. 2025.** Disponível em: <https://hub.ecosystemmarketplace.com/taxonomy>. Acesso em: 24 jun. 2025.

EDGAR – Emission Database for Global Atmospheric Research. **GHG emissions of all world countries 2024.** European Commission, Joint Research Centre, EDGAR, 2024. Disponível em: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2024. Acesso em: 18 abr. 2025.

ENSSLIN, Leonardo; NETO, Gilberto Montibeller; NORONHA, Sandro MacDonald. **Apoio à decisão:** metodologias para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas. Florianópolis: Insular, 2001.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2026:** ano base 2025. Rio de Janeiro: EPE, 2026. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2026>. Acesso em: 10 jun. 2026.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Panorama do Biometano:** Setor Sucroenergético. Rio de Janeiro: EPE, dez. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-781/Panorama%20de%20Biometano.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2025.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio.** Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-bases-para-a-consolidacao-da-estrategia-brasileira-do-hidrogenio>. Acesso em: 04 jul. 2025.

EUROPEAN UNION. **EU Emissions Trading System (EU ETS).** Disponível em: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/about-eu-ets_en. Acesso em: 29 jun. 2025.

GIL, Antonio C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa.** 6. Ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GOMES, Luiz Flávio Autran Monteiro; ARAYA, Marcela Cecília González; CARIGNANO, Claudia. **Tomada de decisões em cenários complexos:** introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão. São Paulo: Thomson Learning, 2004. 168 p.

GRECO, Salvatore; FIGUEIRA, José Rui; EHRGOTT, Matthias (ed.). **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**. New York: Springer, 2009.

GREEN HYDROGEN CATAPULT. **Home**. Disponível em: <https://greenh2catapult.com/>. Acesso em: 15 maio 2025.

GUITARRARI, Luiza; AGUIAR, Ana B.; MARQUES, João V. **O mercado de carbono no Brasil: desafios para harmonização com mecanismos setoriais**. FGV Energia, 2025. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/opinioes/o-mercado-de-carbono-no-brasil-desafios-para-harmonizacao-com-mecanismos-setoriais>. Acesso em: 25 jun. 2025.

HWANG, Joonsik; MAHARJAN, Krisha; CHO, HeeJin. **A review of hydrogen utilization in power generation and transportation sectors: achievements and future challenges**. International Journal of Hydrogen Energy, [S.l.], v. 48, n. 74, p. 28629–28648, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.024>. Acesso em: 12 jul. 2025.

HWANG, Ching-Lai; YOON, Kwangsun. **Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications**. Berlin: Springer-Verlag, 1981.

ICAP – INTERNATIONAL CARBON ACTION PARTNERSHIP. **China National ETS**. 2025a. Disponível em: <https://icapcarbonaction.com/en/ets/china-national-ets>. Acesso em: 13 jun. 2025.

ICAP – INTERNATIONAL CARBON ACTION PARTNERSHIP. **Brazilian Greenhouse Gas Emissions Trading System**. 2025b Disponível em: <https://icapcarbonaction.com/en/ets/brazilian-greenhouse-gas-emissions-trading-system>. Acesso em: 13 jun. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Energy Review 2025 – CO₂ emissions**. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions>. Acesso em: 19 abr. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Matriz Energética e Elétrica**: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#ENERGETICA>. Acesso em: 19 jun. 2025.

INDUCHOODAN, T. G.; HAQ, Izharul; KALAMDHAD, Ajay S. **14 - Factors affecting anaerobic digestion for biogas production: a review**. Advanced organic waste management: sustainable practices and approaches. [S. l.]: Elsevier, 2022. p. 223–233. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85792-5.00020-4>. Acesso em: 29 jun. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Sixth Assessment Report (AR6) – Synthesis Report**. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. Acesso em: 19 abr. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Fifth Assessment Report (AR5) – Annex 3**. Geneva: IPCC, 2018. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf#page=7. Acesso em: 12 mar. 2026.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Geneva: IPCC, 2006. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf. Acesso em: 12 fev. 2026.

JUNSHUAI, Lv; WANG, Su; MENG, Beibei. **The effects of nano-additives added to diesel-biodiesel fuel blends on combustion and emission characteristics of diesel engine: a review**. *Energies*, [S.l.], v. 15, n. 3, 1032, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/3/1032>. Acesso em: 04 jul. 2025.

KABEYI, Moses J. B.; OLANREWAJU, Oludolapo A. **Biogas production and applications in the sustainable energy transition**. *Journal of Energy*, [S. l.], v. 2022, article ID 8750221, 43 p., jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/8750221>. Acesso em: 29 jun. 2025.

KEENEY, Ralph L.; RAIFFA, Howard. **Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

KUO, Ting; CHEN, Ming-Hui. **On using pairwise comparison in the analytic hierarchy process: Validity is goal while consistency is means**. *Information Sciences*, Amsterdam, v. 648, art. 119630, nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119630>. Acesso em: 12 mar. 2026.

LEITE, Henrique P.S. **O mercado de carbono explicado em perguntas e respostas**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2023. Disponível em: <https://bd.camara.leg.br/bd/bitstreams/d3a58368-6d9a-40b6-be0d-38e76b04e64f/download>. Acesso em: 17 maio 2025.

MADZÍK, Peter; FALÁT, Lukáš. **State-of-the-art on analytic hierarchy process in the last 40 years: Literature review based on Latent Dirichlet Allocation topic modelling**. *PLoS ONE*, San Francisco, v. 17, n. 5, e0268777, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268777>. Acesso em: 23 abr. 2026.

MARAKAS, George M. **Decision support systems in the twenty-first century**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.

MARIA, Camila S. **Mercado de créditos de carbono no Brasil e no mundo: regulamentação, atores, desafios e oportunidades**. 2024. Monografia (Especialização em Tecnologias Digitais e Inovação Sustentável) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/f752ef07-9188-4369-8886-6f5316978b17/Camila_Santa_Maria.pdf. Acesso em: 13 maio 2025.

MASERA, Kemal; HOSSAIN, Abul Kalam. **Advancement of biodiesel fuel quality and NOx emission control techniques**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S.l.], v. 178, 113235, maio 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113235>. Acesso em: 01 jul. 2025.

MEADOWS, Damien; YORDI, Beatriz; VIS, Peter. **Addressing carbon leakage under the EU ETS**. Delivering a Climate Neutral Europe. 1. ed. Routledge, 2024. p. 21. Disponível em: <https://doi.org/10.4324/9781003493730-6>. Acesso em: 06 jul. 2025.

MILTENBERGER, Oliver; JOSPE, Christophe; PITTMAN, James. **The Good Is Never Perfect: Why the Current Flaws of Voluntary Carbon Markets Are Services, Not Barriers to Successful Climate Change Action**. Frontiers in Climate, v. 3, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.686516>. Acesso em: 28 jun. 2025.

MMA - Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **COP29 termina com acordo sobre nova meta de financiamento climático global**. Brasília: MMA, 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/cop29-termina-com-acordo-sobre-nova-meta-de-financiamento-climatico-global>. Acesso em: 17 maio 2025.

MMA - Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Convenção das Nações Unidas – Acordo de Paris**. 2021. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 19 jun. 2025.

MMA - Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Brasil entrega à ONU nova NDC alinhada ao Acordo de Paris**. 2024b. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-entrega-a-onu-nova-ndc-alinhada-ao-acordo-de-paris>. Acesso em: 29 jun. 2025.

NEA – NATIONAL ENVIRONMENT AGENCY. **Carbon Tax. 2025**. Disponível em: <https://www.nea.gov.sg/our-services/climate-change-energy-efficiency/climate-change/carbon-tax>. Acesso em: 27 jun. 2025.

NOWAK, Eric. **Voluntary Carbon Markets**. SIX White Paper. SSRN, 2022. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=4127136>. Acesso em: 11 jun. 2025.

NRDC – NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL. **Paris Climate Agreement. 2025**. Disponível em: <https://www.nrdc.org/stories/paris-climate-agreement-everything-you-need-know>. Acesso em: 13 jun. 2025.

OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. Brasília: IPEA, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11291>. Acesso em: 05 jul. 2025.

PANT, Sangeeta; KUMAR, Anuj; RAM, Mangey; KLOCHKOV, Yury; SHARMA, Hitesh Kumar. **Consistency Indices in Analytic Hierarchy Process: A Review**. Mathematics, Basel, v. 10, n. 8, art. 1206, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.3390/math10081206>. Acesso em: 21 mar. 2026.

PETRILLO, Antonella; SALOMON, Valerio Antonio Pamplona; TRAMARICO, Claudemir Leif. **State-of-the-Art Review on the Analytic Hierarchy Process with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks**. *Journal of Risk and Financial Management*, Basel, v. 16, n. 8, art. 372, 2023.

DOI: <https://doi.org/10.3390/jrfm16080372>. Acesso em: 22 jan. 2026.

PILLAI, S. U.; SUEL, T.; CHA, S. **The Perron-Frobenius theorem: some of its applications**. *IEEE Signal Processing Magazine*, New York, v. 22, n. 2, p. 62-75, mar. 2005. DOI: 10.1109/MSP.2005.1406483. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1406483>. Acesso em: 15 maio 2026.

PROLO, Camila D.; PENIDO, Gabriel; SANTOS, Isabela T.; LA HOZ THEUER, Stephanie. **Explicando os mercados de carbono na era do Acordo de Paris**. Rio de Janeiro: ICS, 2021. Disponível em: <https://climaesociedade.org/publicacao/explicando-os-mercados-de-carbono-na-era-do-acordo-de-paris/>. Acesso em: 13 maio 2025.

RENTERIA, Natália. **BIOMAS Mapas Mercado de Carbono**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-tematicas/agrocarbono-sustentavel/biomass_mercados-de-carbono.pdf. Acesso em: 15 jun. 2025.

RODRIGUES, Auro de Jesus. **Metodologia científica: completo e essencial para a vida universitária**. São Paulo: Avercamp, 2006. 217 p.

ROY, Bernard. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

ROY, Bernard. **Decision science or decision-aid science?** *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 184-203, 1993.

SAATY, Thomas L.; VARGAS, Luis G. **Comparison of eigenvalue, logarithmic least squares and least squares methods in estimating ratios**. *Mathematical Modelling*, [S.l.], v. 5, n. 5, p. 309–324, 1984. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(84\)90008-3](https://doi.org/10.1016/0270-0255(84)90008-3). Acesso em: 15 abr. 2026.

SAATY, Thomas L. **The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, Thomas L. **How to make a decision: the analytic hierarchy process**. *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I). Acesso em: 20 abr. 2026.

SAATY, Thomas L.; VARGAS, Luis G. **Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks**. New York: Springer, 2006.

SAATY, Thomas L. **Decision making with the analytic hierarchy process.** *International Journal of Services Sciences*, Geneva, v. 1, n. 1, p. 83–98, 2008. DOI:10.1504/IJSSCI.2008.017590. Acesso em: 20 out. 2025.

SICA, Everthon Taghori; BRIGATTO, Gelson Antonio Andrea; CAMARGO, C. Celso B.; PALMA, A. S.; CARVALHO, R. T.; OKUDA, B. S. **Multiattribute value function for the assessment of distributed generation projects:** application to technical criteria. In: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), [S.I.], IEEE, São Paulo, p. 561–567, 2010. DOI: 10.1109/TDC-LA.2010.5762938. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5762938>. Acesso em: 06 jul. 2026

SHIRAISHI, Shunsuke; OBATA, Tsuneshi. **Pairwise comparison matrices with a high consistency ratio and acceptable priority vectors.** *Asian Journal of Sustainability and Social Responsibility*, v. 10, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43069-024-00412-x>. Acesso em: 13 fev. 2026.

SHRESTHA, Ram M.; SHARMA, Sudhir; TIMILSINA, Govinda R.; KUMAR, S. **Baseline Methodologies for Clean Development Mechanism Projects: A Guidebook.** Edited by Myung-Kyoon Lee. Roskilde: UNEP Risø Centre on Energy, Climate and Sustainable Development, Risø National Laboratory, 2005. 203 p.: DOI: 10.13140/2.1.2462.4009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/264742780_Baseline_Methodologies_for_Clean_Development_Mechanism_Projects. Acesso em: 13 jan. 2026.

SOBCZUK, Sebastian; JARÓN, Agata; MAZUR, Mateusz; BORUCKA, Anna. **Renewable Energy and CO₂ Emissions:** Analysis of the Life Cycle and Impact on the Ecosystem in the Context of Energy Mix Changes. *Energies*, Basel, v. 18, n. 13, art. 3332, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18133332>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/13/3332>. Acesso em: 29 jun. 2026.

SPIPKER, Gregor; NUGENT, Nick. **Voluntary carbon market derivatives:** Growth, innovation & usage. *Borsa Istanbul Review*, [S.I.], v. 22, n. 2, p. 109-118, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bir.2022.11.008>. Acesso em: 29 jun. 2025.

SQUADRITO, Gaetano; MAGGIO, Gaetano; NICITA, Agatino. **The green hydrogen revolution.** *Renewable Energy*, [S.I.], v. 216, 119041, nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119041>. Acesso em: 06 jul. 2025.

TEIXEIRA, Joyce. E. C. T.; BELDERRAIN, Mischel. C. N. **Aplicabilidade da teoria de utilidade multicritério na seleção de sistemas de ensino brasileiro.** Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE), 2011, Blumenau. Blumenau: ABENGE, 2011.

TIBURCIO, Rodolfo Sbrolini; MACEDO, Thales Rocha de; NETO, Ana Maria Pereira. **Brazilian Biofuels Policy (RenovaBio):** overview and generation of decarbonization credits by biodiesel production facilities. *Energy for Sustainable Development*, [S.I.], v. 77, 101334, dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101334>. Acesso em: 02 jul. 2025.

TRENNEPOHL, Natascha. **Mercado de carbono e sustentabilidade: desafios regulatórios e oportunidades**. São Paulo: Ed Saraiva, 2022.

TRIANAPHYLLOU, Evangelos. **Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.

UN – UNITED NATIONS. **Status of Treaties**: Paris Agreement. 2025. Disponível em: https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en. Acesso em: 15 jun. 2025.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Carbon Markets**. 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/topics/climate-action/climate-finance/carbon-markets>. Acesso em: 29 jun. 2025.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. **The Paris Agreement**. Bonn: UNFCCC, 2024. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. Acesso em: 18 abr. 2025.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. **Paris Agreement**: Status of Ratification. Bonn: UNFCCC, 2025a. Disponível em: <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/status-of-ratification>. Acesso em: 16 jun. 2025.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. **Article 6 of the Paris Agreement: 2023 Webinar series**. UNFCCC, 2023. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Webinar%20I_Overview%20of%20Art.6%20of%20the%20PA.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. **Paris Agreement Crediting Mechanism**. Bonn: UNFCCC, 2025b. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/article-64-mechanism>. Acesso em: 16 jun. 2025.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. **Article 6.8 of the Paris Agreement**. Bonn: UNFCCC, 2025c. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/article-6/article-68>. Acesso em: 16 jun. 2025.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. **CDM Project A**. UNFCCC, 2026a. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1241699458.61/view>. Acesso em: 12 fev. 2026.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. **ACM0006: Electricity and heat generation from biomass**. UNFCCC, 2026b. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/2IE2L3F73E90999CBVWXZ8WL40J819>. Acesso em: 12 jan. 2026.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change.
CDM Project B. UNFCCC, 2026c. Disponível em:
<https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/RINA1453817822.23/view>.
 Acesso em: 15 fev. 2026.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change.
ACM0001: Methodology for landfill gas project activities. UNFCCC, 2026d.
 Disponível em:
<https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/JPYB4DYQUXQPZLBDVPHA87479EMY9M>
 Acesso em: 02 fev. 2026.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change.
CDM Project C. UNFCCC, 2026e. Disponível em:
<https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/KEMCO1575278821.24/view>
 Acesso em: 15 fev. 2026.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change.
ACM0002: Consolidated baseline methodology for grid-connected electricity generation from renewable energy sources. UNFCCC, 2026f. Disponível em:
<https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/XB1TX7TAZ6SLWM9B7BC67THHVD16JV>.
 Acesso em: 02 fev. 2026.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change.
CDM Project D. UNFCCC, 2026g. Disponível em:
<https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-RHEIN1352952821.92/view>
 Acesso em: 19 fev. 2026.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change.
AM0124: Methodology for large-scale grid-connected electricity generation from renewable energy. UNFCCC, 2026h. Disponível em:
<https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/X31VJK28R9DCAKOMET9BRS2PXSIKKX>.
 Acesso em: 13 mar. 2026.

UNTERSTELL, Natalie; WATANABE JR., Shigueo. **Por um mercado de carbono – mas qual?**, Rio de Janeiro, junho, 2023. Disponível em:
<https://institutotalanoa.org/wp-content/uploads/2023/06/POR-UM-MERCADO-BRASILEIRO-DE-CARBONO-MAS-QUAL-3-2.pdf>. Acesso em: 19 maio 2025.

VARGAS, Daniel B.; DELAZERI, Linda M. M.; FERREIRA, Vinicius H. P. **Mercado de carbono voluntário no Brasil: Na realidade e na prática.** São Paulo: FGV EESP, 2022. Disponível em: <https://agro.fgv.br/publicacao/ocbio-mercado-de-carbono-voluntario-no-brasil-na-realidade-e-na-pratica>. Acesso em: 10 jun. 2025.

VARGAS, Daniel B.; DELAZERI, Linda M. M.; FERRERA, Vinicius H. P. **O avanço do mercado voluntário no Brasil: Desafios estruturais, técnicos e científicos.** São Paulo: FGV EESP, 2021. Disponível em:
https://eesp.fgv.br/sites/eesp.fgv.br/files/mercado_de_carbono_2.pdf. Acesso em: 02 jun. 2025.

VERRA. **VCS Project E**. Disponível em:
<https://registry.terra.org/app/projectDetail/VCS/2486>.
Acesso em: 26 fev. 2026.

VIEGAS, Paulo R. A. **Perspectivas do “hidrogênio verde” no Brasil em 2021**. Brasília: Senado Federal, Núcleo de Estudos e Pesquisas da Consultoria Legislativa, 2021. (Boletim Legislativo n. 90). Disponível em:
<https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/boletins-legislativos/bol90>. Acesso em: 12 jul. 2025.

WASKOW, David *et al.* **Resultados da COP30**: para além das manchetes, avanços e frustrações. São Paulo: WRI Brasil, 2025. Disponível em:
<https://www.wribrasil.org.br/noticias/resultados-da-cop30-para-alem-das-manchetes-avancos-e-frustracoes>. Acesso em: 10 jan. 2026.

WORLD BANK. **State and Trends of Carbon Pricing Dashboard**. 2025a. Disponível em: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/instrument-detail>. Acesso em: 24 jun 2025.

WORLD BANK. **State and Trends of Carbon Pricing Dashboard**. 2025b. Disponível em: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/coverage>. Acesso em: 24 jun 2025.

WRI – WORLD RESOURCES INSTITUTE. **O que são as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) e por que são importantes?**. WRI, 2024. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/o-que-sao-contribuicoes-nacionalmente-determinadas-ndcs-e-por-que-sao-importantes>. Acesso em: 19 maio 2025.

YANG, Dahye; PARK, Hye Min. Integrity challenges in carbon markets: Comparing UNFCCC and voluntary REDD+ verification in the Amazon Biome. **Environmental Science & Policy**, [S. l.], v. 169, p. 104080, 2025. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104080>. Acesso em: 10 jun. 2025.