

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GABRIELA BORRA TEIXEIRA DE FREITAS

**APLICAÇÃO DO ELECTRE III E COMPARAÇÃO METODOLÓGICA COM O
PROMETHEE II NO RANQUEAMENTO DE ALTERNATIVAS DE MELHORIA EM
UMA USINA TERMELÉTRICA A BIOMASSA**

CURITIBA

2026

GABRIELA BORRA TEIXEIRA DE FREITAS

**APLICAÇÃO DO ELECTRE III E COMPARAÇÃO METODOLÓGICA COM O
PROMETHEE II NO RANQUEAMENTO DE ALTERNATIVAS DE MELHORIA EM
UMA USINA TERMELÉTRICA A BIOMASSA**

Application of ELECTRE III and Methodological Comparison with PROMETHEE II in
Ranking Improvement Alternatives for a Biomass Thermoelectric Plant

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR)

Orientador: Thiago Alberto Rigo Passarin

Coorientador: Edson Pinheiro de Lima

CURITIBA

2026



[4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença

GABRIELA BORRA TEIXEIRA DE FREITAS

**APLICAÇÃO DO ELECTRE III E COMPARAÇÃO METODOLÓGICA COM O
PROMETHEE II NO RANQUEAMENTO DE ALTERNATIVAS DE MELHORIA EM
UMA USINA TERMELÉTRICA A BIOMASSA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR)

Data de aprovação: 23 / junho / 2026

Thiago Alberto Rigo Passarin
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marjorie Maria Bellinello
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Eduardo de Freitas Rocha Loures
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2026

Dedico este trabalho aos meus pais
que me motivaram desde o dia 1

AGRADECIMENTOS

Meu primeiro agradecimento vai a meus pais. Por me celebrarem nos dias felizes e me levantarem nos dias difíceis. Obrigada por estarem sempre do meu lado me apoiando com tanto amor e nunca me deixando desistir.

Agradeço a minha família e amigos pelo afeto ao longo da minha graduação. Com certeza tornado tudo mais completo e leve.

Minha trajetória pela engenharia definitivamente não foi como eu esperava, e ela teria sido muito mais difícil se eu não tivesse tido o apoio de tantos amigos e colegas. Ao longo desses semestres muitas pessoas cruzaram e apoiaram minha jornada e não poderia deixar de agradecer especialmente a algumas delas.

Ao Thiago que acompanhou durante todo o desenvolvimento desse trabalho. Sua praticidade, clareza com palavras e tranquilidade tornaram essa tarefa muito mais fácil.

Ao Edson por ter me feito conhecer o universo multicritério, ter acompanhado minha iniciação científica e por ser um daqueles professores que se vê o brilho dos olhos pela educação.

Aos meus colegas e amigos, agora novos engenheiros. Dentre esses, um obrigada especial a Sofia Massaneiro e ao Matheus Lisarte, queridos, amáveis e dedicados me apoiaram e acreditaram em mim mesmo quando nem eu acreditei. Vocês estiveram comigo em muitos dos meus momentos mais memoráveis no bloco centro.

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP sob gestão da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

" Quero te dizer também que nós, as criaturas humanas, vivemos muito (ou deixamos de viver) em função das imaginações geradas pelo nosso medo. Imaginamos consequências, censuras, sofrimentos que talvez não venham nunca e assim fugimos ao que é mais vital, mais profundo, mais vivo. A verdade, meu querido, é que a vida, o mundo dobra-se sempre às nossas decisões florescem e os frutos são colhidos pela eternidade."

Lygia Fagundes Telles, *As Meninas* (1973)

RESUMO

A crescente busca por fontes de energia renovável, aliada à preocupação global com a redução das emissões de gases de efeito estufa, tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas baseados em bioenergia. Nesse contexto, a gestão e a melhoria de usinas termoelétricas a biomassa exige ferramentas capazes de integrar simultaneamente critérios técnicos, econômicos e ambientais. Este trabalho realizou um estudo de caso, aplicando o método de decisão multicritério ELECTRE III para o ranqueamento de alternativas de melhoria em uma usina termelétrica movida a cavaco de madeira, estruturando o processo decisório conforme o Framework em 12 Etapas de Almeida (2013). Com base em seis critérios de desempenho e seis alternativas de transformação para a usina, o modelo produziu uma classificação final que posicionou a Biomassa com Maior Poder Calorífico (A2) e a Otimização Elétrica dos Sistemas (A3) no primeiro nível de preferência. A robustez do modelo foi validada por duas abordagens complementares de análise de sensibilidade: primeiro, pela variação dos pesos dos critérios e, depois, pela variação dos coeficientes da matriz de desempenho, atingindo índices de estabilidade de 82,5% e 92,1%, respectivamente. Os resultados foram então comparados com um modelo de decisão multicritério obtido pelo PROMETHEE II, aplicado à mesma base de dados por Sônego (2025), o que permitiu uma análise comparativa metodológica, identificando convergências nos extremos do ranking, divergências no grupo intermediário e diferenças estruturais quanto ao tratamento da incomparabilidade, à lógica de agregação e ao comportamento dos métodos diante de perturbações nos parâmetros. O estudo contribui para a aplicação do ELECTRE III na gestão industrial de usinas de biomassa, reforça o valor do Framework em 12 Etapas como estrutura organizacional para modelos decisórios e evidencia que a análise comparativa entre métodos multicritério distintos é uma estratégia eficaz para ampliar a qualidade e a fundamentação das decisões em contextos industriais complexos.

Palavras-chave: Biomassa; ELECTRE III; Estudo de caso; PROMETHEE II.

ABSTRACT

The growing demand for renewable energy sources, combined with global efforts to reduce greenhouse gas emissions, has driven the expansion of bioenergy-based systems. In this context, the management and improvement of biomass-fired thermoelectric plants require tools capable of simultaneously integrating technical, economic, and environmental criteria. This work carried out a case study applying the Multi-Criteria Decision-Making method ELECTRE III to rank improvement alternatives in a wood-chip-fired thermoelectric plant, structuring the decision-making process according to Almeida's (2013) 12-Step Framework. Based on six performance criteria and six transformation alternatives, the model produced a final ranking that placed Biomass with Higher Calorific Value (A2) and Electrical Systems Optimization (A3) in the first preference level. Model robustness was validated through two complementary sensitivity analysis approaches: variation of criterion weights and variation of the performance matrix coefficients, yielding stability indices of 82.5% and 92.1%, respectively. The results were then compared against a Multi-Criteria Decision-Making model obtained through PROMETHEE II, applied to the same dataset by Sônego (2025), enabling a methodological comparative analysis that identified convergences at the ranking extremes, divergences in the intermediate group, and structural differences regarding the treatment of incomparability, aggregation logic, and method behavior under parameter perturbations. The study contributes to the application of ELECTRE III in the industrial management of biomass plants, reinforces the value of the 12-Step Framework as an organizational structure for decision models, and illustrates how that comparative analysis between distinct multicriteria methods is an effective strategy for enhancing the quality and grounding of decisions in complex industrial contexts.

Keywords: Biomass, ELECTRE III, Case Study; PROMETHEE II.

LISTA DE FIGURAS E GRÁFICOS

Figura 1 – Fluxograma do trabalho.....	18
Figura 2 – Representação da geração de uma termoeletrica	24
Figura 3 – Separação "Mundo Real" com o "Mundo do Modelo Decisorio"	27
Figura 4 – Divisão do Framework em 12 etapas e suas 3 fases.....	27
Figura 5 – Etapas do projeto	36
Figura 6 – Diagrama das etapas do ELECTRE III.....	42
Figura 7 – Relação gráfica de preferência de alternativa genérica A_i e A_j	61
Figura 8– Relação de preferência das alternativas analisadas no MDCM.....	61
Gráfico 1 – Consumo direto de energia primaria no mundo de 1850 a 2024	21
Gráfico 2 – Produção de energia elétrica por fonte de 1965 a 2024	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ordenação dos critérios conforme impacto pelo decisor	55
Tabela 2 – Ordenação das alternativas na classificação Descendente.....	60
Tabela 3 – Ordenação das alternativas na classificação Ascendente.....	60
Tabela 4 – Classificação final das alternativas pelo ELECTRE III.....	61
Tabela 5 – Rankings e ocorrências na análise de sensibilidade 1.....	62
Tabela 6 – Critério por total de rankings com desvio	63
Tabela 7– Rankings e ocorrências na análise de sensibilidade 2.....	64
Tabela 8– Ranking final do ELECTRE III e do PROMETHEE II.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Limiares de Preferência	32
Quadro 2 – Inserção da Pesquisa Entre as Referências.....	38
Quadro 3 – Exemplo de como ficaria a matriz.....	40
Quadro 4 – Objetivos da decisão Multicritério	45
Quadro 5 – Caracterização dos critérios.....	48
Quadro 6 – Escala de desempenho para critérios de minimização.....	48
Quadro 7 – Escala de desempenho para critérios de maximização	49
Quadro 8 – Matriz de Desempenho: relação entre critérios e alternativas	53
Quadro 9 – Matriz de Concordância	57
Quadro 10 – Matriz de Credibilidade	57
Quadro 11 – Matriz de Concordância com diagonal zero	58
Quadro 12 – Matriz determinada pelo coeficiente de corte	59
Quadro 13 – Soma das linhas e colunas da matriz	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
CEO	<i>Chief Executive Office</i>
EPE	<i>Empresa de Pesquisa Energética</i>
EA	<i>International Energy Agency</i>
MCDM	<i>Multicriteria Decision Making</i>
ONU	<i>Organização das Nações Unidas</i>
ODS	<i>Objetivos de Desenvolvimento sustentável</i>
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema Elétrico</i>
SIN	<i>Sistema Interligado Nacional</i>
UTFPR	<i>Universidade Tecnológica Federal do Paraná</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
1.2	Justificativa e Contribuições.....	17
1.3	Estrutura do Trabalho	17
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Bioenergia	19
2.2	Visão Geral sobre as Bioenergias.....	19
2.3	Panorama Mundial da Bioenergia	20
2.4	Biomassa de Cavaco de Madeira: Geração e Manutenção.....	23
2.5	Decisão Multicritério (MCDM).....	25
2.6	Framework em 12 etapas de Almeida.....	26
2.2.1	Fase Preliminar	28
2.2.2	Modelagem de preferências escolha do método	29
2.2.3	Finalização	29
2.8	ELECTRE.....	30
2.9	PROMETHEE.....	33
2.10	Biocombustíveis e MCDM: Revisão do Estado da Arte	34
3.	METODOLOGIA E O MODELO.....	36
3.1	Delineamento da Pesquisa	37
3.2	Referência para a pesquisa	38
3.3	Procedimento de aplicação de modelagem	39
3.4	Etapas do método ELECTRE III.....	39
3.4.1	Determinar os valores iniciais.....	39
3.4.2	Determinar a matriz de concordância	39
3.4.3	Determinar a matriz de discordância	40
3.4.4	Determinar o ranking de credibilidade e a matriz equivalente	40
3.4.5	Processo de destilação Ascendente e Descendente.....	41
3.4.6	Classificação final.....	41
3.5	Análise de sensibilidade	43
4.	MODELAGEM DO ELECTRE III.....	44
4.1	Caracterização dos decisores e outros autores	44
4.2	Objetivos da decisão.....	45
4.3	Critérios Estabelecidos.....	46

4.4	Espaço de ações e problemática	49
4.5	Fatores não controlados.....	50
4.6	Modelagem das preferências	51
4.7	Avaliação intracritério	52
4.8	Avaliação intercritério	54
4.9	Avaliação das alternativas pelo ELECTRE III.....	55
4.9.1	Obter a matriz de Concordância.....	55
4.9.2	Obter a Matriz de Discordância	57
4.9.3	Matriz de Credibilidade.....	57
4.9.4	Destilação Descendente.....	58
4.9.4	Destilação Ascendente.....	60
4.9.5	Classificação final.....	60
4.10	Análise de sensibilidade	62
4.10.1	Análise de Sensibilidade por peso dos critérios	62
4.10.2	Análise de Sensibilidade por valores da matriz de desempenho	63
5.	ANÁLISE DE RESULTADOS	65
5.1	Resultados do ELECTRE III	65
5.2	Comparação do ELECTRE III e PROMETHEE II	67
5.3	Implementação da decisão.....	68
6.	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS.....	73

1. INTRODUÇÃO

O setor de bioenergias consolidou-se como um pilar da transição global para a sustentabilidade, destacando-se pela geração de eletricidade e combustíveis limpos, com baixas emissões de gases de efeito estufa (IEA, 2024; COLLA et al., 2020). Essa relevância é impulsionada pela amplitude e diversidade do segmento, que abrange múltiplos métodos de conversão e uma vasta gama de matérias-primas (ZIOLKOWSKA, 2020).

No Brasil, a demanda crescente por energia, o aumento da população e a redução do uso de combustíveis fósseis estão entre as razões pelas quais o uso de biomassa de cavaco de eucalipto tornou-se uma opção viável para a geração de energia. (PEREIRA; NICOLAU; BAZZO, 2018). A área vem crescendo expressivamente, consolidando-se especialmente nos biocombustíveis e na energia térmica; apenas em 2024, 40,6% da geração térmica brasileira foi oriunda de biomassa (EPE, 2025).

Entretanto, essa área de pesquisa ainda apresenta lacunas expressivas, sobretudo devido à vasta diversidade de substratos, às análises restritas a contextos muito específicos e a projetos com baixa replicabilidade — limitações agravadas pela dificuldade de conciliar aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais (PÉREZALMADA et al., 2023). Esse cenário impacta diretamente a escolha de matérias-primas, a definição dos métodos de geração e o aprimoramento das usinas. Diante disso, torna-se essencial desenvolver e refinar metodologias integradas que viabilizem a avaliação conjunta desses múltiplos critérios (RAMAN et al., 2025).

Buscando ferramentas para solucionar esse problema, os métodos de decisão multicritério (MCDM) vêm se mostrando eficazes, especialmente em problemas operacionais, como a escolha do substrato conforme a região de implementação. (RIGO et al., 2020). Entretanto, ainda faltam pesquisas aplicadas à melhoria industrial e à comparação dos resultados obtidos com diferentes métodos de aplicação de MCDM.

Dentre os métodos de sobreclassificação (outranking) disponíveis, o ELECTRE III destaca-se por incorporar pseudocritérios e limiares de indiferença, preferência e veto, o que permite tratar situações de incerteza, imprecisão e inconsistência nos dados de entrada, características frequentes em avaliações de desempenho baseadas no julgamento técnico de decisores industriais.

(TAHERDOOST; MADANCHIAN, 2023; FIGUEIRA; ROY, 2005). Essa flexibilidade torna o método especialmente adequado ao contexto de usinas de biomassa, no qual os indicadores de desempenho técnico nem sempre apresentam diferenças absolutas entre alternativas, mas sim variações que podem ser consideradas relevantes pelo decisor.

O PROMETHEE II, por sua vez, compartilha com o ELECTRE III a lógica de comparação par a par e a natureza não compensatória, mas constrói o ranqueamento final por meio de fluxos líquidos de superação, resultando em uma classificação completa e sem incomparabilidades, diferença clara em relação ao ELECTRE III, que classifica conforme a interseção de dois processos de destilação: ascendente e descendente. (BRANS; MARESCHAL, 2005; MAJDI, 2013). Ou seja, ambos pertencem à mesma família conceitual de apoio à decisão, mas podem produzir leituras distintas a partir da mesma base de dados. Essa diferença estrutural é justamente o que torna relevante e válida a metodologia de comparação entre os dois métodos.

Nesse sentido, este projeto de pesquisa propõe uma nova aplicação do estudo de caso realizado pelo autor Diego Melo Sonêgo com o PROMETHEE II, desta vez aplicando o método ELECTRE III e confrontando o desenvolvimento metodológico obtido nas duas pesquisas. Para isso, serão mantidos os coeficientes, alternativas, critérios e pesos definidos na pesquisa de Sônego (2025), a fim de garantir a comparabilidade entre os dois modelos.

O trabalho de Sônego desenvolveu um modelo de ranqueamento de 6 alternativas de melhoria no processo de geração de energia, para uma planta de geração a biomassa de cavaco de madeira, considerando as necessidades e oportunidades da usina. Desse modo, essa pesquisa manteve a mesma matriz de decisão justamente a fim de manter a comparação válida e assertiva.

Além disso, serão comparadas as robustezes por meio da alteração dos pesos dos critérios e dos coeficientes da Matriz de Desempenho, bem como das variações nos rankings e das diferenças na aplicação entre os dois métodos. Segundo Almeida (2013), a análise de sensibilidade constitui uma etapa indispensável na fase de finalização de qualquer modelo de apoio à decisão multicritério, pois é por meio dela que se verifica se os parâmetros definidos pelo decisor, tais como os pesos dos critérios e os coeficientes de desempenho, exercem influência desproporcional sobre o resultado final. Ou seja, avaliam que a recomendação não dependa de uma

combinação específica e pouco estável de valores de entrada. Essa pesquisa busca oferecer ao decisor industrial não apenas um ranqueamento, mas também uma compreensão mais clara de quão sensível essa decisão é trazer mais clareza à escolha da alternativa para a usina.

Diante do exposto, este trabalho busca responder à seguinte questão: "O ELECTRE III e o PROMETHEE II produzem ranqueamentos convergentes para o mesmo conjunto de alternativas de melhoria e critérios de desempenho de uma usina termelétrica a biomassa?".

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho é aplicar o método ELECTRE III no ranqueamento de alternativas de melhoria em uma usina termelétrica a biomassa e realizar uma análise de comparação metodológica com o PROMETHEE II, identificando convergências, divergências e diferenças na construção dos modelos decisórios a partir de um estudo de caso real.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Contrastar as metodologias ELECTRE III e PROMETHEE II por meio da comparação entre os modelos e os resultados obtidos no estudo de caso.
2. Aplicar a metodologia "Framework em 12 Etapas" para apresentação de MCDM de maneira eficaz e coesa.
3. Ranquear estratégias de melhoria e sugerir alternativa, em uma planta de geração de energia a biomassa pelo método ELECTRE III

1.2 Justificativa e Contribuições

Esse projeto de pesquisa justifica-se pela relevância contemporânea das bioenergias e pela escassez de projetos que utilizem MCDM na gestão de usinas. Além disso, ganha valor pelo viés da pesquisa comparativa, com base em uma base de dados real. Por fim, também realiza contribuições teóricas, práticas e metodológicas para que possa ser replicada.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está separado conforme os seguintes capítulos:

Capítulo 1 (Introdução): apresenta a perspectiva geral do tema e da proposta de pesquisa com objetivo, justificativa e estrutura do trabalho.

Capítulo 2 (Fundamentação teórica): discorre sobre o contexto geral das bioenergias no mundo e no curso da história além das características das usinas de biomassa a cavaco de eucalipto também contextualiza o que são os MCDM, o método framework 12 etapas e os métodos ELECTRE e PROMETHEE

Capítulo 3 (Proposta e Metodologia): define o delineamento da pesquisa e apresenta as etapas práticas para a realização do estudo de caso.

Capítulo 4 (Modelagem do MDCM ELECTRE III): etapa a etapa do modelo realizado estruturado segundo os steps do framework.

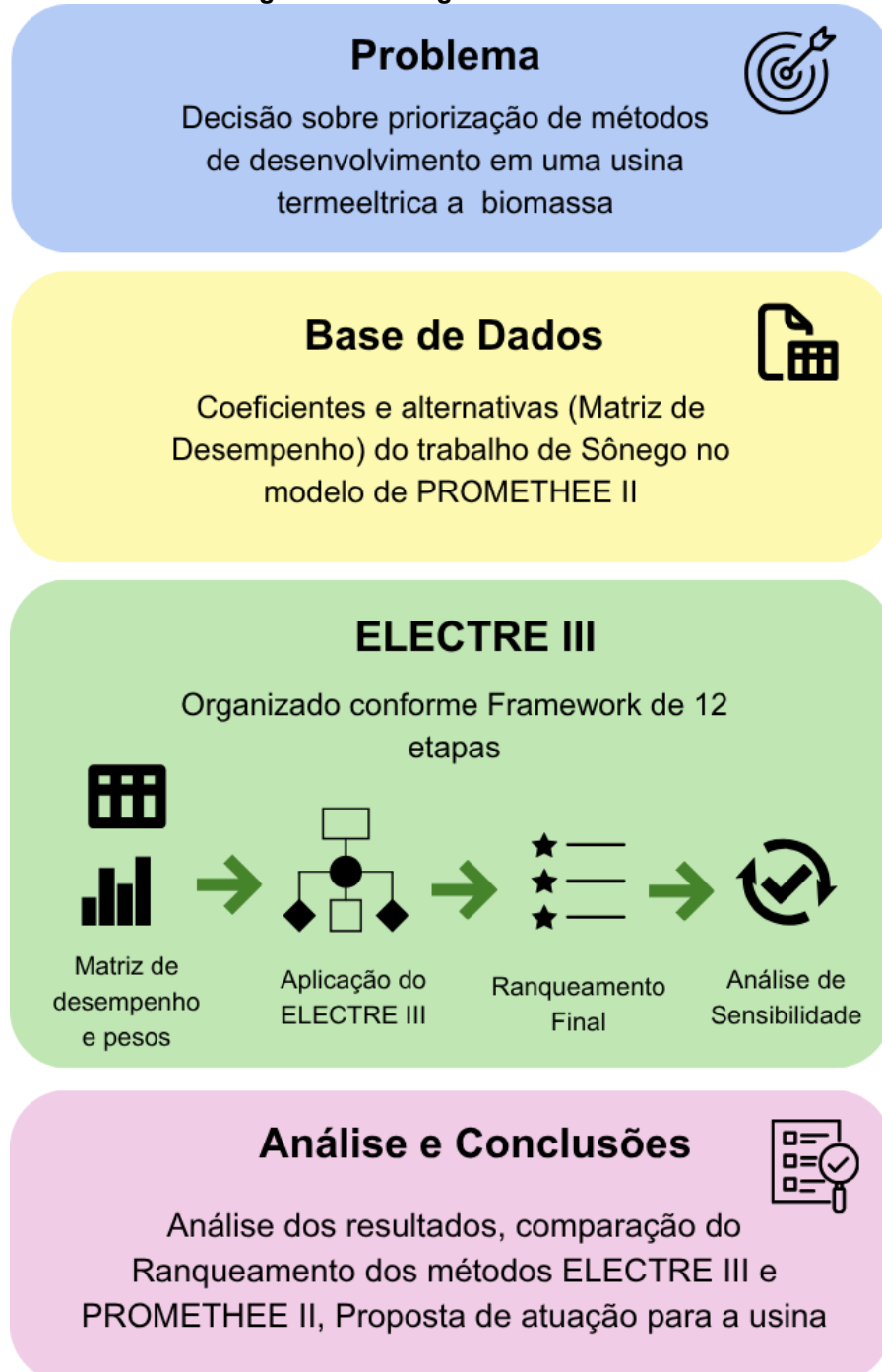
Capítulo 5 (Análise de Resultados): Análise dos resultados do ELECTRE III, comparação com o ranking final do PROMETHEE II, e sugestão da implementação final da decisão considerando ambas as pesquisas.

Capítulo 6 (Conclusão): revisa os tópicos abordados e as conclusões da pesquisa.

A ilustração a seguir faz uma representação visual das principais etapas de desenvolvimento do trabalho. Com o objetivo de resumir e introduzir a estrutura geral

do projeto de estudo. Considerando 4 blocos de trabalho: qual o problema estudado, a origem dos dados, as etapas de estruturação do ELECTRE III e a conclusão.

Figura 1 – Fluxograma do trabalho



Fonte: Autoria Própria (2026)

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam o desenvolvimento da pesquisa, incluindo conceitos relacionados à bioenergia, à biomassa e ao cenário do setor, seguidos da contextualização da decisão multicritério e do framework adotado. Por fim, são discutidos os métodos ELECTRE III e PROMETHEE, bem como estudos da literatura que integram biocombustíveis e apoio multicritério à decisão.

2.1 Bioenergia

A bioenergia compreende a geração de energia renovável a partir de matéria orgânica (vegetal ou animal). Essa fonte é amplamente utilizada nos setores industrial, comercial e residencial para gerar calor, combustível e energia elétrica. Além disso, ela é considerada sustentável por seu potencial de neutralidade de carbono, ou seja, consome pelo menos a mesma quantidade de carbono que emite. (WILLIAMS; DAHIYA; PORTER, 2015).

Esse método de geração de energia não é inédito na história e tem sido usado para produzir fogo desde o início da humanidade. Mesmo assim, tem-se destacado no mercado de inovação sustentável do século XXI, cuja expectativa geral é de que seu valor aumente progressivamente. (GUO; SONG W; BUHAIN, 2015)

2.2 Visão Geral sobre as Bioenergias

A "International Energy Agency " (IEA) estima que as bioenergias, nas formas sólidas, líquidas e gasosas, serão responsáveis por 95% do aumento dos combustíveis renováveis até 2030. (IEA,2024). Nacionalmente, esse crescimento já pode ser percebido: no Brasil em 2024, 40,6% da geração térmica foi oriunda de biomassa. Além disso, o consumo final de biodiesel (m³) no país aumentou em 19,3% em 2024 (EPE, 2025). Essas estatísticas evidenciam a importância socioeconômica dessa fonte de energia e, por consequência, a relevância da pesquisa e do desenvolvimento no setor.

A área de bioenergia é bastante ampla, pois abrange combustíveis, biogases e biomassa provenientes de diferentes matérias-primas. Essa variedade de opções de substratos exige diferentes ramos de pesquisa e estudos individualizados conforme o

tipo. Nessa mesma linha, uma das maiores dificuldades para o desenvolvimento do setor é a construção de métodos de pesquisa que possam ser estendidos para além de uma única matéria-prima. (ZIOLKOWSKA, 2020; COLLA *et al.*, 2020; DUTTA; DAVEREY; LIN, 2014).

Em síntese, a bioenergia é um mercado que tem se destacado como uma estratégia energética importante na contemporaneidade, por sua contribuição ao desenvolvimento econômico, social e ecológico. Entretanto, devido à sua diversidade de substratos, apresenta desafios à elaboração de pesquisas uniformes e abrangentes. Desse modo, explica-se que, para o desenvolvimento do setor de energia, devem ser realizados trabalhos que empreguem métodos facilmente replicáveis. (MORONE; STRZAŁKOWSKI; TANI, 2020).

2.3 Panorama Mundial da Bioenergia

Desde o início da história, o uso de bioenergia esteve presente. Tem-se registro de seu uso desde a pré-história, com o emprego de toras de madeira para acender fogo. Nesse período a energia era utilizada com o objetivo de gerar luz, aquecer, cozinhar e produzir peças. (GUO; SONG W; BUHAIN, 2015).

Até a metade do século XIX, a lenha era o combustível predominante para cozinha e aquecimento; essa realidade se alterou com o início da exploração de carvão vegetal, gás natural e, especialmente, de petróleo no século XX. (GOLDEMBERG, 2009)

Entretanto, especialmente a partir dos anos 80, com a crise do petróleo e o aumento dos preços dos combustíveis, aumentou-se a preocupação global com o uso de energia e o uso de energias renováveis começou a crescer exponencialmente. Além disso, as pesquisas sobre o aquecimento global e sua relação com as emissões de CO₂ incentivaram ainda mais a busca por fontes de energia limpas. (YANG *et al.* 2024) No Brasil, essa preocupação gerou, inclusive, a criação do Proálcool, programa de 1975, voltado à ampliação das energias renováveis e à redução da dependência brasileira do petróleo. (MME 2024)

Ao redor do mundo, essa movimentação pró-renováveis vinculou-se expressivamente à ideia de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, tendo inclusive se tornado pauta em diferentes tratados internacionais. Por exemplo, o Acordo de Paris, firmado em 2015, foi assinado por mais de 190 países, com o

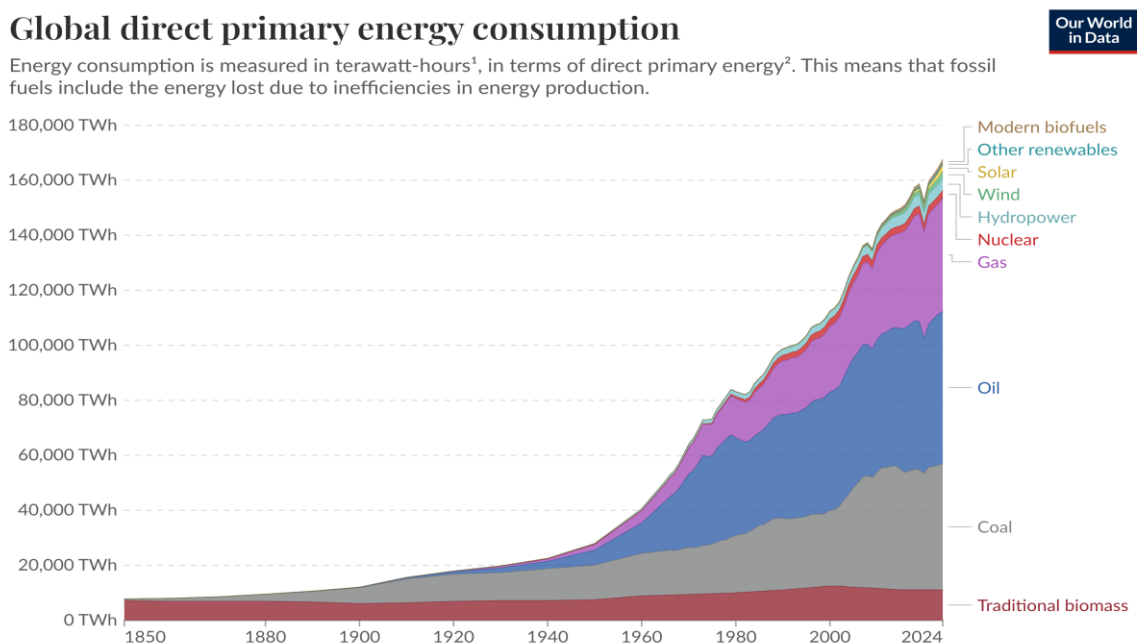
compromisso de mitigar o aquecimento global. (PEREIRA, 2025) Outro movimento significativo foi a definição da Agenda de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, que tem entre suas prioridades os ODS 7 – Energia Limpa e Sustentável e 13 – Ação contra a mudança global do clima. (ONU, 2025)

Esse comportamento das mudanças nas matrizes energéticas é mais facilmente compreendido por meio de uma visualização em linha do tempo. O gráfico 1 mostra o consumo de energia primária disponível ao longo da história (de 1850 a 2024). Nesse gráfico, é possível compreender alguns parâmetros técnicos e históricos nos avanços das tecnologias de energia; é importante ressaltar que ele inclui as perdas de energia no processo de geração, por ser analisado a partir da energia primária. (Our World Data, 2025)

A faixa vermelha mostra como a biomassa tradicional, como a lenha, era predominante, mas se estagnou ao longo do tempo, enquanto, a partir de 1850, os impactos do carvão (“coal” em cinza) e, a partir de 1950, do petróleo (“oil” em azul-escuro) se tornaram predominantes na matriz energética.

Os biocombustíveis modernos (“modern biofuels” em marrom), junto às demais energias renováveis, compõem uma faixa estreita e recente em relação às energias não renováveis, o que demonstra que a mudança de matriz energética ainda é um desafio.

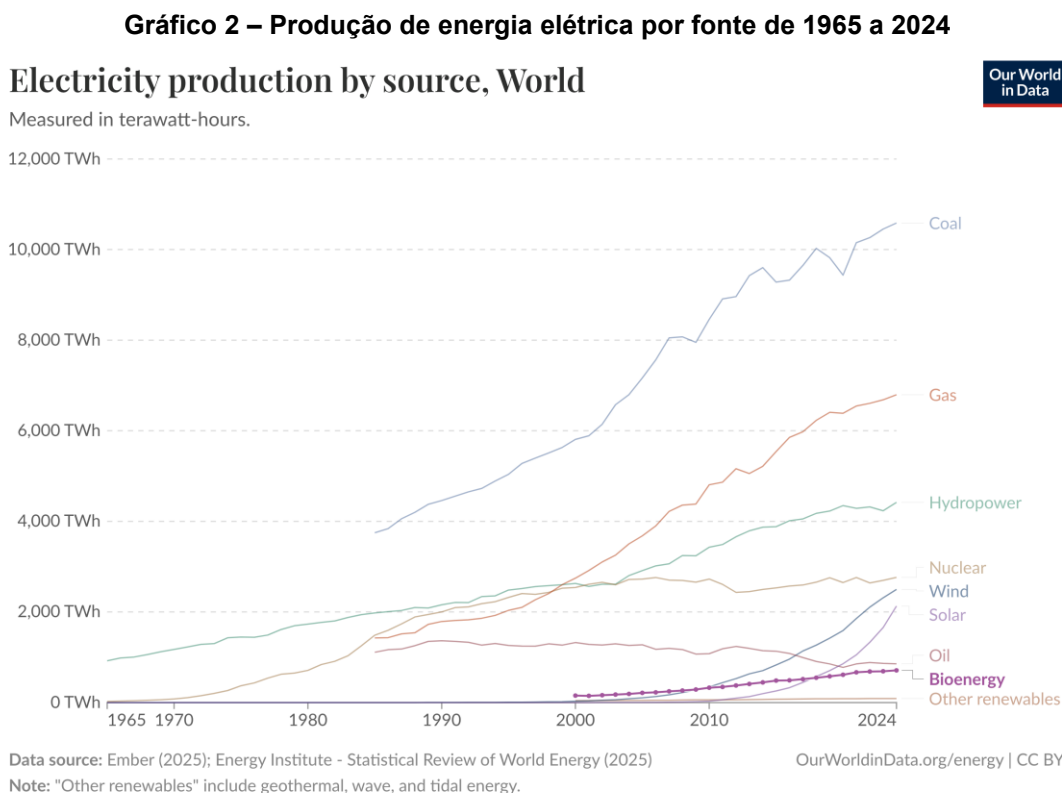
Gráfico 1 – Consumo direto de energia primária no mundo de 1850 a 2024



Fonte: Our World in Data (2025)

O gráfico 2, por sua vez, mostra diretamente a produção elétrica por tipo de energia no mundo, com o destaque para as bioenergias (em rosa) a partir dos anos 2000. (OUR WORLD DATA, 2025)

Esse gráfico reforça que o uso de fontes de energia não renováveis ainda é expressivo na geração de energia elétrica. Também ajuda a visualizar o crescimento acelerado das energias renováveis, quase exponencial nas matrizes eólica e solar, enquanto é mais constante nas bioenergias no mesmo período. A bioenergia na geração elétrica é produzida principalmente a partir de termoelétricas que queimam biomassa; nesse caso, não se considera o uso de biocombustíveis para transporte. (OUR WORLD DATA, 2025)



Fonte: Our World in Data (2025)

Apesar de sempre ter sido uma matriz importante, o crescimento recente do interesse em biocombustíveis está intimamente ligado à valorização das medidas para mitigar os efeitos do aquecimento global. Mostrando a importância de pesquisas no setor que envolvam a preocupação com a sustentabilidade e o desenvolvimento econômico para o futuro. (WILLIAMS; DAHIYA; PORTER, 2015)

2.4 Biomassa de Cavaco de Madeira: Geração e Manutenção

A diversidade de matérias-primas para geração de energia se estende ao subgrupo das biomassas. Apenas nessa fonte de energia estão entre as principais matérias-primas: resíduos de outros biocombustíveis, desperdícios da indústria agrícola, materiais orgânicos e biomassa de microalgas. (ZIOLKOWSKA, 2020; COLLA *et al.*, 2020; DUTTA; DAVEREY; LIN, 2014).

A biomassa é frequentemente utilizada como combustível direto em usinas termelétricas, sendo preferível aos combustíveis fósseis por ser mais barata e ecossustentável, pois reduz as emissões de CO₂. As biomassas de restos industriais possuem algumas vantagens adicionais, já que não demandam área de plantio e são uma solução para os dejetos de produção. (BALOPI *et al.*, 2025)

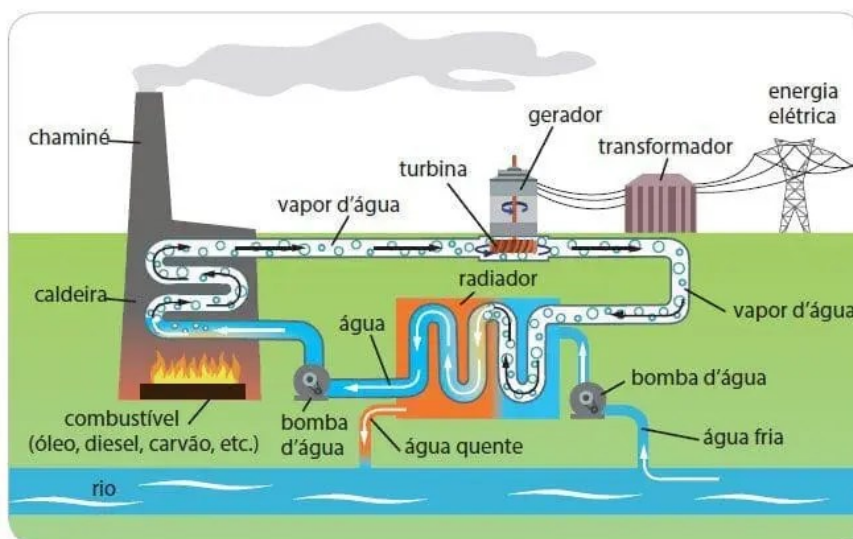
O cavaco de madeira é um desses substratos obtidos a partir de restos industriais. Os cavacos de madeira são definidos como pequenos troços de madeira, com diâmetro entre 3 e 130 mm, produzidos pela picagem de toras ou de resíduos de árvores urbanas, geralmente destinados à fabricação de itens de madeira maciça. (UCELLA-FILHO *et al.*, 2025)

No Brasil, em 2024, 8,5% da matriz energética baseava-se no conjunto de lenha vegetal, carvão e cavaco de madeira. (EPE, 2024). É mais comum o uso de eucalipto e pinus, dado que são as madeiras de crescimento rápido mais produzidas no Brasil. (UCELLA-FILHO *et al.*, 2025)

A utilização do cavaco de madeira para a geração de energia pode ser realizada em usinas termelétricas. Nesse caso, a biomassa é queimada por combustão, aquecendo uma caldeira com água. O vapor gerado movimenta uma turbina, que converte a energia mecânica em energia elétrica. Além disso, um condensador acoplado à caldeira permite o resfriamento do vapor, possibilitando a reutilização da água no mesmo ciclo. (BALOPI *et al.*, 2025; TURSI, 2020).

A geração de energia a cavaco de madeira costuma ter um poder calorífico inferior (PCI) entre 16 e 20 MJ/kg e uma eficiência elétrica de até 40 %. Para isso, é necessário manter a umidade da biomassa inferior a 50% antes da queima, fator essencial para o adequado funcionamento da geração de energia. (TURSI, 2020; FERREIRA E BRAZ, 2024; NEIVA; FURTADO e FINZER, 2018; PEDIŠIUS *et al.*, 2021)

Figura 2 – Representação da geração de uma termoeletrica



Fonte: Energia Inteligente (PET – UFJF)

Essa fonte de energia depende de diversos fatores logísticos para ser desenvolvida. Existe um crescimento iminente na avaliação do ciclo de vida desse substrato, e há muitas preocupações quanto ao viés financeiro e corporativo. Entretanto, continua sendo uma dificuldade equilibrar aspectos de sustentabilidade, desenvolvimento, distribuição logística, planejamento a longo prazo, aceitação social e regulamentação. Desse modo, evidencia como é difícil, no mercado energético, conciliar diferentes aspectos de fundamentos e teorias tão distintos. (MORONE; STRZAŁKOWSKI; TANI, 2020; STANULA *et al.*, 2023a)

A expansão dessa fonte esbarra na complexidade de gerenciar variáveis voláteis, como a sazonalidade do suprimento, a eficiência da conversão térmica e a própria logística de transporte do cavaco (PÉREZ-ALMADA *et al.*, 2023). Diante de gargalos técnicos e operacionais tão interdependentes, a escolha de rotas de modernização de usinas ou de novos insumos não pode ser feita de forma isolada, o que exige a priorização de alternativas com base em múltiplos critérios concomitantes. Desse modo, é justamente a necessidade de integrar essas dimensões conflitantes que justifica e impulsiona o emprego de métodos matemáticos robustos, como os de Apoio Multicritério à Decisão (MCDM) (RAMAN *et al.*, 2025).

Em síntese, o cavaco de madeira é uma das principais biomassas lenhosas no Brasil e uma fonte de energia renovável, com o diferencial de apresentar potencial de carbono zero. Entretanto, ainda carece de estudos para se desenvolver de forma sustentável e relevante na matriz energética, especialmente no que se refere ao

equilíbrio entre os aspectos econômicos, sociais, técnicos e logísticos. A dificuldade em conciliar isso justifica a ampliação dos métodos matemáticos robustos, como os de análise multicritério, para a seleção de estratégias de melhoria e para o desenvolvimento de plantas de produção de energia.

2.5 Decisão Multicritério (MCDM)

As ferramentas de “Multi Criteria Decision Making” (MCDM) são amplamente utilizadas em problemas de decisão em diversas áreas de pesquisa. Seu valor está vinculado à sua replicabilidade em diferentes eixos decisórios, nos quais encontrar uma solução é um problema complexo. (ZYOUD; FUCHS-HANUSCH, 2017).

Sendo a área de biocombustíveis ampla e com aspectos distintos a serem considerados, seu desenvolvimento justifica-se plenamente pelo uso de avaliadores capazes de analisar múltiplos critérios simultaneamente, como em métodos multicritério. (RAMAN *et al.*, 2025).

Os MCDM são modelos para a solução de problemas nos quais há pelo menos duas alternativas de ação a serem escolhidas ou ordenadas por preferência. O desafio nesses exemplos é tomar uma decisão considerando critérios em unidades diversas e conflitantes. Essas ferramentas decisórias permitem realizar análises das alternativas de forma integrada, utilizando medições inclusive em unidades, direções e objetivos distintos. (ALMEIDA, 2013)

Quando se realizam estudos sobre estratégias de melhoria de sistemas, considera-se diversos aspectos que se tornam mais facilmente analisáveis por meio de um sistema de decisão multicritério. Nesse caso, consegue-se incluir métricas técnicas, ecológicas, financeiras e ambientais tanto para a seleção quanto para o ranqueamento de alternativas. (LIU; LIN; REN, 2020)

Os modelos de análise multicritério envolvem diferentes agentes na composição do processo decisório. Sendo os principais deles: o decisor, os investidores e os analistas. Essas figuras atuam de forma complementar, representando partes técnicas e de gestão de forma aditiva. (ALMEIDA, 2013)

Existem diferentes métodos de decisão multicritério, como FITradeOff, PROMETHEE, AHP, Macbeth, entre outros. Eles se diferenciam na forma como o decisor define suas preferências e na maneira como os critérios são numericamente ponderados; ainda assim, compartilham o propósito comum de serem ferramentas

assertivas de análise e gestão. (ALMEIDA, 2013; ZYOUD e FUCHS-HANUSCH, 2017)

Uma das classificações mais comuns dos métodos MCDM é a separação entre metodologias compensatórias e não compensatórias. Um modelo não compensatório pressupõe que uma alternativa com um critério muito ruim não pode ser compensada por um critério muito bom; tem-se como exemplos o ELECTRE e o PROMETHEE. Já os modelos compensatórios realizam uma soma ponderada das alternativas e, portanto, um critério muito positivo pode compensar um critério negativo, como no MACBETH e no AHP. (INMETRO, 2022; TAHERDOOST; MADANCHIAN, 2023 b).

A escolha do método adequado para o estudo e a realização de todas as etapas, com descrição, são processos essenciais para a construção de um bom modelo decisório e para alcançar a melhor resposta ao problema. (INMETRO 2022; ALMEIDA 2013)

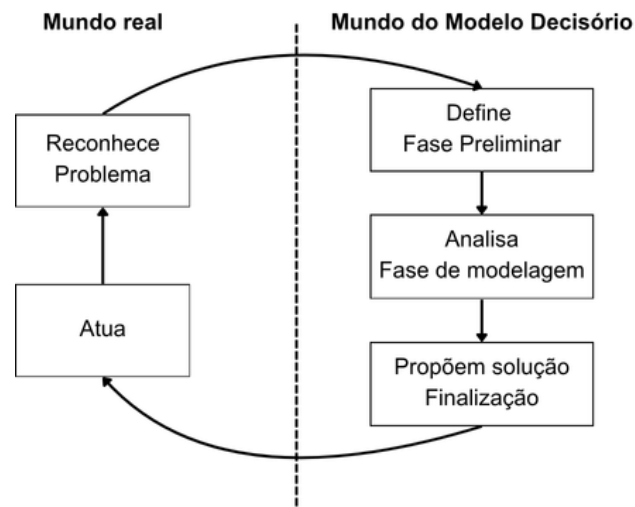
2.6 Framework em 12 etapas de Almeida

Uma estratégia amplamente utilizada para estruturar a construção de modelos de Apoio Multicritério à Decisão é o Framework em 12 Etapas, apresentado por Almeida (2013). Essa abordagem é eficaz para compreender, descrever e demonstrar as fases de um problema decisório complexo, auxiliando diretamente na organização lógica do modelo. Desse modo, o Framework 12 Etapas é uma estratégia robusta para a construção de modelos decisórios.

Essa metodologia pressupõe a existência de definições preliminares; ou seja, antes de sua implementação, elementos fundamentais, como o escopo do projeto, o objetivo principal e a consequência principal esperada, já devem estar estabelecidos (ALMEIDA, 2013).

Além disso, a problemática estudada nessa ferramenta divide-se e é mais bem compreendida em duas grandes esferas. O “mundo real”: situação com um problema que requer uma decisão e na qual a resposta do MCDM será efetivamente aplicada. E depois o “mundo do problema decisório”, espaço de análise da problemática, no qual a metodologia chegará a uma resposta para a atuação, como representado na Figura 3. (ALMEIDA, 2013)

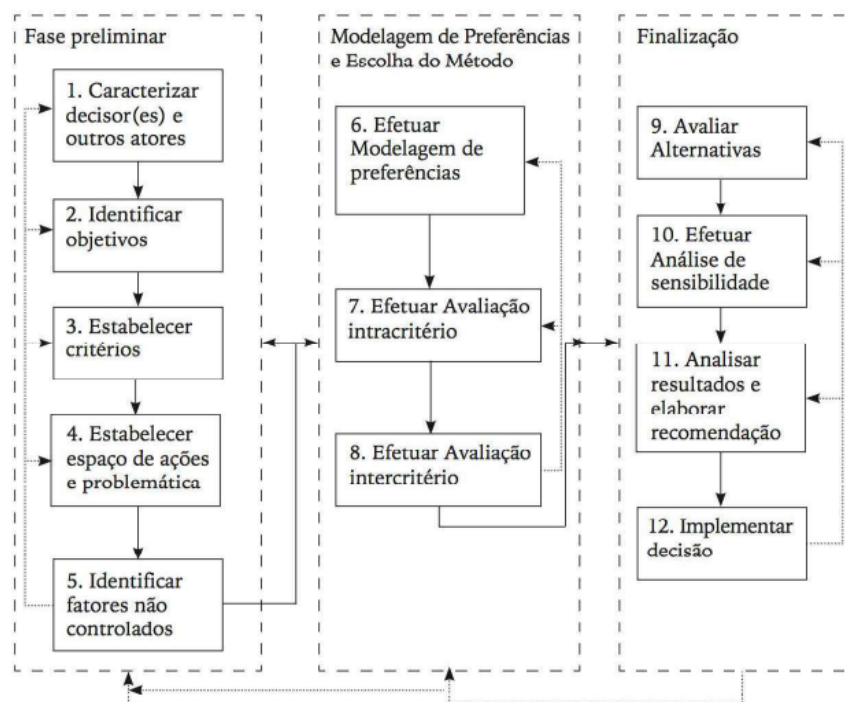
Figura 3 – Separação "Mundo Real" com o "Mundo do Modelo Decisório"



Fonte: adaptada de Processo de Decisão nas organizações, 2013, página 162

O Framework de 12 etapas é eficiente porque compõe, de maneira completa, o MCDM, ao dividir, de forma prática, as três fases principais de desenvolvimento: preliminar, modelagem de preferências e escolha do método e finalização; e, desse modo, estrutura de maneira objetiva e clara. A figura 4 mostra as 12 etapas e sua divisão em 3 fases. (ALMEIDA, 2013)

Figura 4 – Divisão do Framework em 12 etapas e suas 3 fases



Fonte: Processo de Decisão nas organizações, 2013, página 165

2.2.1. Fase Preliminar

A fase preliminar é a que inicia a estrutura do modelo decisório; estabelece a base a ser utilizada nas demais etapas e é relevante para compreender e explorar o caso como um todo. (ALMEIDA, 2013)

Sua primeira etapa é a definição dos atores: quem são os correspondentes e os representantes nos papéis de decisores. Esses atores são mais facilmente compreendidos no contexto de problemas corporativos, já que costumam ser figuras como o CEO, os investidores e os analistas. (ALMEIDA, 2013)

Depois do decisor, definem-se os objetivos; eles nos preparam para identificar os critérios e dividi-los conforme o propósito e a direção (maximizar ou minimizar). Os objetivos, com título e descrição breves, constituem metas de resultado do modelo. (ALMEIDA, 2013)

Com o propósito de alcançar os objetivos, definem-se os critérios. Eles são classificados por tipo, nível, unidade, direção e consequência natural, sendo mais comumente apresentados em formato de tabela. O tipo de critério é um dos fatores que definem o método multicritério mais adequado. Desse modo, é essencial que estejam definidos de forma assertiva. (ALMEIDA, 2013)

Na sequência, escolhe-se o espaço de ação e a problemática. Essa etapa é relevante para caracterizar o espaço das ações adotadas. O espaço de ações e alternativas pode ser classificado, por exemplo, como discreto, globalizado, fragmentado, estável ou evolutivo. Ainda nessa etapa, determina-se a problemática, ou seja, qual a relação a ser obtida entre as alternativas: escolha, classificação, ranqueamento ou outras. (ALMEIDA, 2013)

Por fim, a última etapa da fase preliminar, a identificação de fatores não controlados, é importante para identificar itens que não estão no domínio do decisor, como critérios que envolvem fatores não controlados, por exemplo, demanda e custo, que, nesse caso, seriam definidos como variáveis de estado de natureza. (ALMEIDA, 2013)

2.2.2 Modelagem de preferências escolha do método

A modelagem das preferências está intimamente ligada à determinação de parâmetros em conjunto com o decisor. Ou seja, determina-se a preferência quanto aos critérios, avaliando, inclusive, seus valores e direções conforme o método escolhido.

Nesta etapa, explicitam-se os aspectos que determinaram a escolha do método multicritério, justificando-se sua adoção e caracterizando os parâmetros a serem determinados pelo decisor.

As relações intracritérios e intercritérios também são estabelecidas nessa fase. Com esses dados compilados, formam-se a matriz de critérios, a matriz de pesos e a matriz de desempenho, todas adequadas à aplicação no método multicritério adotado. (ALMEIDA, 2013)

2.2.3 Finalização

Na terceira fase, tem-se os critérios, objetivos e método do modelo adequadamente definidos e sólidos, de modo que essa parte é utilizada para a análise das alternativas, o refinamento, a verificação de robustez e o planejamento da recomendação, conforme as respostas do modelo. Essa fase se inicia com a avaliação das alternativas por meio da aplicação do modelo de decisão, ou seja, do método multicritério em si e, assim, da resposta do modelo. (ALMEIDA, 2013)

Como os métodos possuem parâmetros e pesos de influência elevados para o decisor, é essencial realizar a análise de sensibilidade. Esse processo consiste em alterar os valores de entrada para confirmar o percentual de robustez dos resultados de saída. Garantindo, assim, a satisfação da análise e a adequação aos objetivos do decisor. (ALMEIDA, 2013)

Validando as respostas pela sensibilidade, segue-se, então, para a etapa de análise de resultados e de elaboração de recomendações. Essa etapa consiste diretamente no desenvolvimento de uma proposta para aplicar as respostas do modelo no mundo real. Permitindo, assim, chegar à etapa final do framework: a implementação da decisão, ou seja, a organização aplicará o que for decidido. (ALMEIDA, 2013)

2.8 ELECTRE

Bernaud, Roy e Susan criaram, nos anos 60, um método de decisão multicritério por eliminação de alternativas. Roy acabou por desenvolver e diversificar esse método com a família ELECTRE. Esse nome é uma sigla em francês: “Élimination et Choix Traduisant la Réalité”, traduzida como “eliminação e escolha que traduzem a realidade”. (TAHERDOOST; MADANCHIAN, 2023; FIGUEIRA; ROY, 2005)

Essa família é composta por diferentes membros, e a metodologia varia conforme o problema em análise. O ELECTRE I é destinado a problemas de escolha; o ELECTRE II, a problemas de ranqueamento com valores reais; o ELECTRE III, ao ranqueamento com a vantagem em situações de inconsistência, incerteza ou indeterminação; por fim, o ELECTRE TRI é aplicado a problemas de atribuição. (TAHERDOOST; MADANCHIAN, 2023; FIGUEIRA; MOUSSEAU; ROY, 2005)

A família ELECTRE se destaca por comparar cada opção a cada critério, o que facilita e aprimora o desenvolvimento e a compreensão, especialmente em comparação aos demais métodos multicritérios. Esse modelo de análise par a par também permite que a matriz seja analisada integralmente. (TAHERDOOST; MADANCHIAN, 2023; OKAR; VARNAMKHASTI; HADIVENCHEH, 2023)

Esse processo de decisão comparativa é essencial para compreender o ELECTRE. A análise é realizada em problemas com m alternativas ($A_i: i = 1, 2, 3, \dots, m$), e n critérios ($X_j: j = 1, 2, 3, \dots, n$) e n fatores de peso ($w_j: j = 1, 2, 3, \dots, n$)., esses fatores de peso sempre são normalizados de modo que:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1. \quad (1)$$

Com os valores definidos, construímos uma matriz $m \times n$. A partir disso, o método funciona com a análise de par a par das alternativas, por exemplo: comparar A_1 com A_2 , A_1 com A_3 , A_1 com A_4 e assim por diante. Essa classificação par a par é realizada de forma binária, com o símbolo “S”, que significa “pelo menos tão bom quanto”. (TAHERDOOST; MADANCHIAN, 2023; FIGUEIRA; ROY, 2005; ALVES; CAMPOS, 2024)

A possibilidade de haver incomparabilidade entre duas alternativas é uma das razões pelas quais o ELECTRE se distingue de outros métodos multicritérios. Nesse

caso, como não existe uma preferência explícita e a indiferença tampouco se aplica, demonstra-se que o ELECTRE é uma família não compensatória, ou seja, diferente dos métodos multicritérios compensatórios, nos quais a pontuação muito baixa de um critério pode ser "compensada" por uma pontuação muito alta em outro. (INMETRO, 2022)

A classificação binária é definida por dois parâmetros principais: concordância e discordância. A concordância indica que, para uma alternativa "A1" sobreclassificar uma alternativa "A2", a maioria de seus critérios se sobressai aos critérios "A2". Já a não-discordância ocorre quando nenhum dos critérios na minoria é significativamente pior do que os demais critérios considerados. (TAHERDOOST; MADANCHIAN, 2023; FIGUEIRA; ROY, 2005)

Para compreender isso melhor, utilizam-se 4 itens de referência de comparação: indiferença (I), preferência estrita (P), preferência fraca (Q) e Incomparabilidade (R). Ao comparar-se uma alternativa A1 e uma alternativa A2 consegue-se, portanto, construir as seguintes relações:

- Preferência estrita (P)
 $A1 \text{ P } A2$: Se e somente se A1 sobre classificar A2 ($A1 \text{ S } A2$)
 $A2 \text{ P } A1$: Se e somente se A2 sobre classificar A1 ($A2 \text{ S } A1$)
- Indiferença (I)
 $A1 \text{ I } A2$: Se A1 sobreclassificar A2 ($A1 \text{ S } A2$) , e A2 sobreclassificar a ($A2 \text{ S } A1$)
- Incomparabilidade(R)
 $A1 \text{ R } A2$: Se A1 não sobreclassifica A2 ($A1 \text{ S } A2$ falso), e A2 não sobreclassifica A1 ($A2 \text{ S } A1$ falso)

(FIGUEIRA; ROY, 2005)

Entretanto, em muitos casos, a análise de sobreclassificação não está clara, especialmente em modelos complexos com muitos critérios. A fim de superar a sobreclassificação binária (sim/não), o ELECTRE III introduziu o uso de confiabilidade fuzzy. (FIGUEIRA; ROY, 2005).

A confiabilidade fuzzy é utilizada para a manipulação de incerteza em diferentes áreas da matemática. Nesse modelo, um conjunto universal "X" possui diversos subconjuntos. A fim de validar se um elemento "A" pertence a "X", é introduzido um valor entre 0 e 1 nomeado grau de evidência. (RIBEIRO; DA SILVA, 2015).

Tem-se desse modo:

$$\begin{aligned} g: P(x) &\rightarrow [0,1] \\ A &\rightarrow g(A) \end{aligned} \quad (2)$$

Considerando isso, a inovação da aplicação do fuzzy no ELECTRE III foi consolidada com a criação de 3 limiares de preferência determinantes decididos junto ao decisor para cada um dos critérios: limiar de indiferença (q_i), limiar de preferência (p_i) e limiar de veto (v_i). No qual: $v \geq q \geq p$. Considera-se também que $g_j(A1)$ é a performance da alternativa $A1$ no critério j . (TAHERDOOST; MADANCHIAN, 2023). Essa análise sempre será aplicada nos casos de sobreclassificação não binária, sendo assim chamada de pseudocritério. (MAJDI, 2013) O quadro 1 representa a descrição desses limiares.

Quadro 1 – Limiares de Preferência

Limiar	Relação	Exemplo
Preferência p_i	$A1 P A2$ se $g_j(A1) > g_j(A2) + p_j$	Estabelece a diferença mínima para que uma alternativa seja estritamente preferível
Indiferença q_i	$A1 Q A2$ se $g_j(A2) + p_j \geq g_j(A1) > g_j(A2) + q_j$ $A1 I A2$ se $g_j(A2) + q_j \geq g_j(A1)$ e $g_j(A2) + q_j \geq g_j(A2)$	Define a diferença máxima que permite declarar as alternativas como indiferentes
Veto v_i	O veto ocorre se: $g_j(A2) - g_j(A1) \geq v_i$	Se a performance de uma alternativa for muito inferior em um critério, (superando o valor de veto) a sobreclassificação é negada

Fonte: Adaptado de Majdi (2013) (Figueira; Roy, 2005)

2.9 PROMETHEE

O PROMETHEE é uma família de métodos multicritérios desenvolvida por Brans e outros a partir de 1982. Esse conjunto inclui diferentes versões, incluindo PROMETHEE I, para problemas de ranqueamento parcial, PROMETHEE II, para ranqueamento completo de alternativas, PROMETHEE III, para ranqueamento de alternativas com intervalo, entre outras. (INMETRO 2022; MAJDI, 2023)

Os métodos PROMETHEE são considerados modelos flexíveis, progressivos e eficientes para a análise multicritério. Assim como no ELECTRE, também realizam a comparação para a par entre critérios e alternativas e a sobreclassificação de maneira não compensatória. (INMETRO 2022; MAJDI, 2023)

Como no ELECTRE, os termos indiferença (I), preferência estrita (P) e incomparabilidade (R) também são válidos. O grande diferencial do PROMETHEE em relação a outros métodos multicritérios é o uso do conceito de "Flow" para cada alternativa. Isso significa que quanto mais positivo um Flow é em relação aos demais, mais aquela alternativa se sobressai na classificação. (BRANS e MARESCHAL, 2005)

A avaliação de preferência nesse método considera dessa forma a relação entre alternativas e critérios da seguinte maneira definida por BRANS e MARESCHAL:

$$\pi(a, b) = \frac{\sum w_j \cdot P_j(a, b)}{\sum w_j} \quad (3)$$

no qual o Flow positivo φ^+ e o Flow negativo φ^- são:

$$\varphi^+(a) = \frac{\sum \pi(a, b)}{(n-1)}. \quad (4)$$

$$\varphi^-(a) = \frac{\sum \pi(b, a)}{(n-1)} \quad (5)$$

E a relação final do out ranking é caracterizada por:

$$\varphi = \varphi^+(a) - \varphi^-(a) \quad (6)$$

A divergência matemática entre o PROMETHEE e o ELECTRE reside especialmente na etapa de ranqueamento. O PROMETHEE simplifica a operação ao calcular fluxos líquidos de superação por meio de uma lógica aditiva, na qual os graus de preferência geram um saldo linear para cada alternativa. Já o ELECTRE III a ordenação final é obtida de maneira não linear através dos algoritmos de destilação ascendente e descendente e depois unidos por meio de interseção (MAJDI, 2023).

Os métodos se assemelham pela análise par a par e pelo fato de ambos serem não compensatórios. Entretanto, o PROMETHEE não utiliza o limiar de veto tampouco a não-discordância, tornando-se um modelo menos rígido e totalmente dependente da função de preferência. Desse modo, caracteriza-se como um modelo de desenvolvimento mais simples e direto; entretanto, pode não ser tão eficaz quanto o ELECTRE na análise de incomparabilidade e de incerteza. (MAJDI, 2023)

2.10 Biocombustíveis e MCDM: Revisão do Estado da Arte

Os biocombustíveis são uma tendência global na produção de energia renovável e um tema crescente nas pesquisas de sustentabilidade. (JAHANSHAH *et al.* 2023). De modo semelhante, os “MCDM” têm se consolidado como estratégia eficiente para processos decisórios complexos na manufatura e na área de tecnologia. O total de métodos, a qualidade e a diversidade de pesquisas em decisão multicritério têm aumentado progressivamente (AVRAMOVA; PENEVA; IVANOV, 2025).

Entretanto, a realização desses processos decisórios, especialmente na área de biocombustíveis, ainda apresenta limitações, como a subjetividade da decisão, os múltiplos tipos de matéria-prima, a necessidade de conhecimento técnico e, especialmente, a necessidade de maior atenção na modelagem dos frameworks. (ALAMOODI *et al.*, 2024). A revisão da literatura visa, portanto, a compreender essas lacunas de pesquisa e a identificar métodos e práticas eficientes no setor para a modelagem de problemas.

Dentre os temas de pesquisa que relacionam multicritérios e biocombustíveis, um dos mais frequentes é a escolha de substrato para a geração de bioenergia (RIGO *et al.*, 2020). Em 2023, ZOMA e SAWADO-GO utilizaram o método híbrido AHP-TOPSIS para a seleção de biomassa em Burkina Faso, com base em critérios sociais, tecnológicos, econômicos e de sustentabilidade. De maneira semelhante, Demir (2025) apresenta uma pesquisa sobre seleção de substrato, usando o método FUZZY.

No Brasil, Chaves e Gomes (2014) aplicaram o método MACBETH para decisão entre as alternativas de biodiesel, bioetanol, biodiesel de algas e H-BIO. Enquanto Ripi (2025) estuda a escolha de biomassa pelo método AHP.

Esses periódicos comprovam a eficácia do uso da análise multicritério em pesquisas com critérios diversos, como os da área energética. Entretanto, mostraram como as aplicações na área são amplas e que não necessariamente adotam métodos semelhantes, reforçando a necessidade de estudos que aprimorem a qualidade e a consistência no uso dessas ferramentas.

Além disso, existe uma lacuna palpável na aplicação de MCDM em problemas de otimização e melhoria na área de gestão industrial de usinas de biomassa, embora já tenham sido realizados em outros campos industriais. Sobre a produção e o dimensionamento de lote, Orvt e Teive (2022) aplicaram o algoritmo NGSA. Específico na área de energias renováveis, enquanto Da Silva et al. (2021) aplicam critérios multicritério para priorizar ordens de serviço e de manutenção em usinas hidrelétricas.

Algumas pesquisas buscam comparar a qualidade e a diferença desses modelos multicritério na área de engenharia. Malekafi et al. (2025) compararam e demonstraram consistência nos resultados da aplicação de MCDMs diferentes em um mesmo problema decisório e declararam isso como uma vantagem no estudo da área de sustentabilidade. Por outra via, Madji (2013) comparou os métodos ELECTRE III e PROMETHEE I, II para um problema de sustentabilidade, que não resultou em ranqueamentos exatamente iguais, mas mostrou como são opções eficientes de comparação devido à sua habilidade de lidar com incerteza, imprecisão e geração de ranqueamento em comparação de pares um a um.

Considerando a necessidade original da usina, que é o ranqueamento das alternativas de melhoria, mesmo sem precisão absoluta dos dados, o ELECTRE III e o PROMETHEE II se adequam perfeitamente por serem métodos de sobreclassificação mesmo com inconsistência ou imprecisão dos dados de entrada.

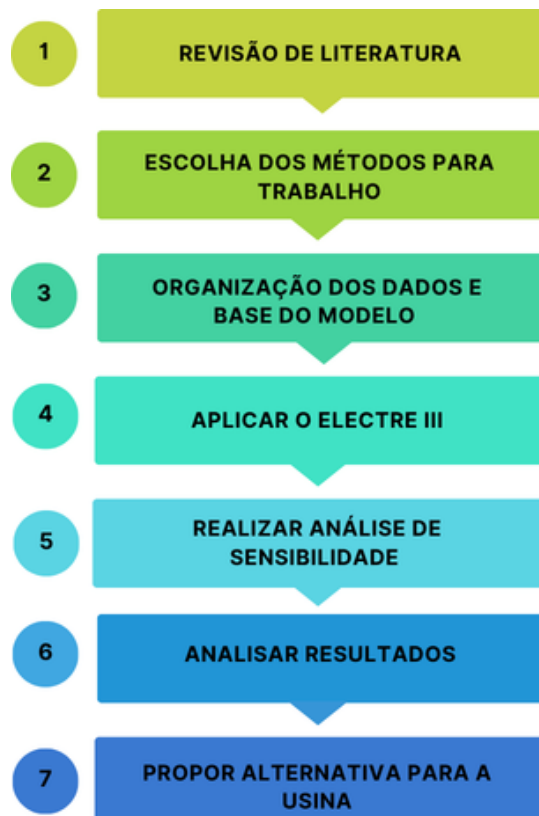
3. METODOLOGIA E O MODELO

A proposta para a próxima etapa desse trabalho enfatiza a importância da pesquisa em biocombustíveis por meio da aplicação de métodos de decisão multicritério. Esse projeto consiste em um estudo de caso sobre uma planta de geração de energia a partir de cavaco de biomassa.

O trabalho será desenvolvido a partir da construção de modelo decisório, com a reaplicação da base de dados (valores numéricos das alternativas e pesos) da dissertação de mestrado de Diego Melô Sonego, da UTFPR de Pato Branco. Nesse projeto de pesquisa, o autor desenvolve, por meio da aplicação do PROMETHEE II, uma modelagem multicritério para o ranqueamento de alternativas de melhoria de uma planta de geração de biomassa a partir de cavaco de madeira.

O diferencial da dissertação em relação a esse projeto de pesquisa será a adoção de um novo método de análise multicritério, o ELECTRE III, e a subsequente comparação das etapas metodológicas entre os dois projetos. As etapas do trabalho são descritas na figura 5 na sequência.

Figura 5 – Etapas do projeto



Fonte: Autoria Própria (2026)

3.1 Delineamento da Pesquisa

Essa pesquisa é de natureza aplicada, visando gerar conhecimento por meio de um exemplo prático de análise multicritério, ranqueando as opções de melhoria de uma usina de biomassa a partir do cavaco de eucalipto. Desse modo, firma-se como estudo de caso com aplicação direta à gestão industrial na área de engenharia elétrica.

O problema é abordado de forma qualitativa e quantitativa. Na parte qualitativa, tem-se a exploração das alternativas e dos critérios, a atribuição de pesos e o estudo das relações de sobreclassificação geradas pelo método. Enquanto na parte quantitativa se destaca o uso de métodos matemáticos aplicados ao MCDM, incluindo a construção de ranking e a análise de sensibilidade. Além disso, a respeito dos procedimentos técnicos para a execução do trabalho, duas etapas principais definem o projeto: primeiro, o contexto e a perspectiva da área, e, em seguida, um estudo de caso.

A primeira parte sobre o contexto e a perspectiva na área foi realizada por meio de pesquisa bibliográfica, com a coleta, síntese e sumarização de estudos da área, considerando a bioenergia, especialmente o cavaco de madeira, e sua importância contemporânea. Além disso, foram incluídos também uma revisão geral sobre métodos multicritérios, especialmente do ELECTRE III, e o uso de um framework em 12 etapas para a construção de MCDM. Essa pesquisa permitiu identificar lacunas na área de pesquisa, como a comparação de metodologias, a seleção de melhorias para usinas de biomassa e a necessidade de pesquisas adaptáveis aos diferentes substratos da bioenergia.

Já a segunda etapa, referente ao estudo de caso, será apresentada a partir do capítulo 4. Foi desenvolvido um modelo de MCDM ELECTRE III usando as mesmas entradas do modelo PROMETHEE II de Sonego (2025): alternativas, critérios de desempenho, seus limiares e seus pesos. Para pôr fim, comparar as diferenças na análise de sensibilidade e nos rankings obtidos entre o ELECTRE III e o PROMETHEE II. A análise de sensibilidade foi realizada por meio de manipulação dos pesos dos critérios e dos dados da matriz de credibilidade, a fim de verificar a robustez.

Por fim, a pesquisa ainda inclui aspectos de análise comparativa, avaliando as diferenças entre ambos os modelos por meio de tabelas e da robustez, avaliando as diferenças metodológicas dos modelos ELECTRE III e PROMETHEE II.

3.2 Referência para a pesquisa

Esse trabalho foi desenvolvido a partir da base de dados do modelo decisório da pesquisa “O Impacto da Transformação Digital na Geração de Energia Elétrica por Biomassa” de Diego Melo Sônego, em 2025. No qual o autor realiza fundamentação teórica sobre o impacto da transformação digital para o desenvolvimento do setor energético, gestão de biomassa e gestão de manutenção.

Essa pesquisa apresenta um estudo de caso voltado à proposição de alternativas de melhoria para uma usina de cogeração a cavaco de madeira, aplicando a metodologia de modelagem do framework de 12 etapas de Almeida. O processo metodológico compreendeu a caracterização dos tomadores de decisão, a definição dos objetivos e critérios e a aplicação do método multicritério PROMETHEE II. A partir da estruturação dos níveis e operações do modelo de Sonego, identificou-se a alternativa “Biomassa com Maior Poder Calorífico” como a de melhor desempenho entre as seis opções analisadas para otimizar a planta. Para identificar a contribuição da pesquisa dentro da área, o quadro 2 situa o trabalho entre as referências.

Quadro 2 – Inserção da Pesquisa Entre as Referências

Autor(es)/Ano	Área	Relacionado com bioenergia	Seleção de Alternativa	Ranking de alternativas	Inclui comparação de Métodos
Zoma e Sawadogo (2023)	Engenharia Energética (Substratos de Biomassa)	X	X		
Demir (2025)	Engenharia Energética (Substratos de Biomassa)	X	X		
Chaves e Gomes (2014)	Engenharia Energética (Substratos de Biocombustíveis)	X	X		
Ripi (2025)	Engenharia Energética (Substratos de Biomassa)	X	X		X
Orti e Teive (2022)	Engenharia industrial (Produção)			X	
Da Silva et al. (2021)	Engenharia Energética (Manutenção)			X	X
Malekafi et al. (2025)	Engenharia (Sustainability Assessment)				X
Majdi (2013)	Engenharia (Sustainability Assessment)				X
Esse trabalho	Engenharia Energética (Melhoria de Sistema)	X		X	X

Fonte: Autoria Própria (2026)

3.3 Procedimento de aplicação de modelagem

As etapas para a realização do projeto de pesquisa basearam-se no framework de 12 etapas de Almeida. As etapas de 1 a 5 do framework são comuns ao modelo desenvolvido por Sonêgo, justamente para que a construção do novo MDCM com ELECTRE seja fiel aos fins de comparação. Com essa metodologia, os itens 6 a 10 do framework correspondem à aplicação do ELECTRE III, à sua análise de sensibilidade e aos seus resultados. Por fim, com o novo modelo construído, foi possível compará-lo ao ranking final do PROMETHEE II obtido por Sônego.

3.4 Etapas do método ELECTRE III

As etapas específicas do método ELECTRE III incluem a definição dos preliminares e o desenvolvimento da relação entre as alternativas. Relembra-se que usa-se as notações A_n , para as alternativas, j_n para critérios, $gj(A_n)$ para a performance de uma alternativa A_n em um critério j .

3.4.1 Determinar os valores iniciais

A primeira etapa do processo é determinar as relações iniciais entre os critérios; isso inclui os coeficientes dos limiares e as preferências entre critérios. Essas relações serão determinadas pelo decisor. Ou seja, nessa etapa tem-se a definição de w_i , p_i , q_i e v_i . (TAHERDOOST; MADANCHIAN, 2023). Na organização do framework, essa etapa fica nos itens 6 – Efetuar avaliação intracritério e 7 – Efetuar avaliação intercritério.

3.4.2 Determinar a matriz de concordância

Realizar o processo de avaliar a concordância da comparação de cada par de critérios de cada alternativa. Como exemplo considera-se uma alternativa A_k uma alternativa A_l avaliadas ambas no critério C_j , tem-se segundo Taherdoost e Madanchian:

$$c_j(k, l) = \frac{gj(A_k) + p_j - gj(A_l)}{p_j - q_j} \text{ se } q_j < gj(A_k) - gj(A_l) \leq p_j \quad (7)$$

$$c_j(k, l) = 1 \text{ se } gj(A_k) - gj(A_l) \leq q_j \quad (8)$$

$$c_j(k, l) = 0 \text{ se } p_j < gj(A_k) - gj(A_l) \quad (9)$$

Tendo calculado todos os possíveis $C_{k,l}$ a seguinte etapa é construir uma matriz de concordância global com a soma desses índices, comparando cada par de alternativas com seu equivalente.

$$C_{kl} = \frac{\sum p_j \cdot c_j(k,l)}{\sum p_j} \quad (10)$$

Quadro 3 – Exemplo de como ficaria a matriz

	A_k	A_l	A_m
A_k	1	C_{kl}	C_{km}
A_l	C_{lk}	1	C_{lm}
A_m	C_{mk}	C_{ml}	1

Fonte: autoria própria

3.4.3 Determinar a matriz de discordância

Essa etapa consiste em avaliar as discordâncias $d_j(k,l)$ para cada par de critérios isso é realizado da seguinte maneira conforme Taherdoost e Madanchian:

$$d_j(k,l) = 1 \text{ se } v_j < g_j(A_k) - g_j(A_l) \quad (11)$$

$$d_j(k,l) = \frac{g_j(A_k) - g_j(A_l) - p_j}{v_j - p_j} \text{ se } p_j \leq g_j(A_k) - g_j(A_l) \leq v_j \quad (12)$$

$$d_j(k,l) = 0 \text{ se } g_j(A_k) - g_j(A_l) \leq p_j \quad (13)$$

3.4.4 Determinar o ranking de credibilidade e a matriz equivalente

Com esses índices determinados, Taherdoost e Madanchian indicam que a próxima etapa é obter o ranking de credibilidade $S(k,l)$. Para isso, utiliza-se agora os coeficientes de concordância e o coeficiente F, que representam o conjunto de critérios para os quais $\{j \in F: d_j(k,l) > C_{kl}\}$.

$$S(k,l) = C_{kl} \text{ se } d_j(k,l) \leq C_{kl} \quad S(k,l) = C_{kl} \cdot \prod_{j \in \bar{F}} \frac{1 - d_j(k,l)}{1 - C_{kl}} \text{ se } d_j(k,l) > C_{kl} \quad (14)$$

3.4.5 Processo de destilação Ascendente e Descendente

É um processo iterativo que abrange todas as alternativas. Para tal, são separados, ou seja, procedimentos: o de destilação ascendente e o de destilação descendente. Em ambas calcula-se os valores de sobreclassificação $S(\lambda)$ através das expressões:

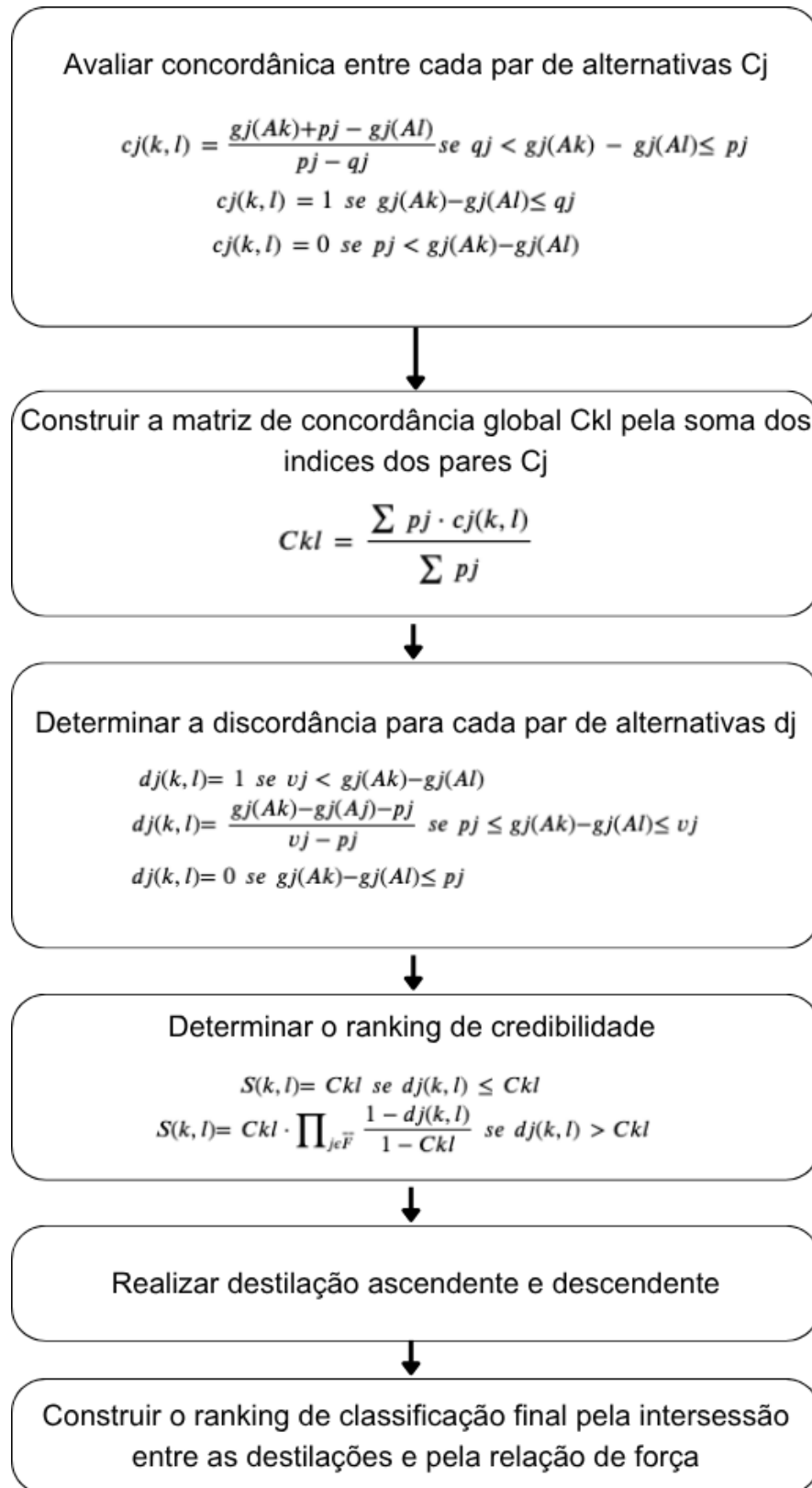
$$\begin{aligned} CS(\lambda) &\geq \lambda_0 - \lambda_1 \\ \text{sendo } \lambda_0 &= \max S(k, l) \\ \text{e } \lambda_1 &= 0,3 - 0,15\lambda_0 \end{aligned} \tag{15}$$

Tendo em vista que, na classificação descendente, a alternativa com maior qualificação forma a primeira destilação e é excluída na iteração seguinte, enquanto, na classificação ascendente, a alternativa com menor qualificação é excluída. Na sequência, para cada alternativa, determina-se sua λ fraqueza, o total de alternativas preferíveis a esta, e λ força, o total de alternativas cuja alternativa é preferível. O λ força e o λ fraqueza são calculados tanto para a classificação ascendente quanto para a descendente. (TAHERDOOST E MADANCHIAN, 2023)

3.4.6 Classificação final

Por fim, combinam-se as informações obtidas em ambas as destilações para definir a ordenação final. Estando essa concluída, a classificação e aplicação do método ELECTRE III estão completas. (TAHERDOOST E MADANCHIAN, 2023) Para representar as etapas do método foi desenvolvida a Figura 6.

Figura 6 - Diagrama das etapas do ELECTRE III



Fonte: Autoria Própria (2026)

3.5 Análise de sensibilidade

A validação da estabilidade do modelo foi realizada por meio de duas abordagens metodológicas complementares de análise de sensibilidade, ambas fundamentadas em processos iterativos de perturbação dos parâmetros.

A primeira abordagem avaliou o impacto da variação dos pesos dos critérios, na qual o peso de cada critério foi individualmente modificado, aplicando-se incrementos de 1% dentro de um intervalo de -20% a $+20\%$ de seu valor original (excluindo-se o cenário de 0% de alteração), enquanto os demais cinco critérios remanescentes foram re-normalizados para manter a soma unitária e preservar a ordem de preferência relativa entre eles.

A segunda abordagem investigou a robustez do ranking final diante de incertezas nos dados de entrada por meio da variação iterativa dos coeficientes da matriz de desempenho; neste procedimento, todos os termos associados a um mesmo critério foram alterados simultaneamente, empregando-se a mesma variação paramétrica, em incrementos de 1%, no intervalo de $\pm 20\%$ em relação aos valores originais. Esse mesmo processo foi replicado no PROMETHEE II para garantir uma comparabilidade fiel entre os métodos.

4. MODELAGEM DO ELECTRE III

Este capítulo apresenta a modelagem do sistema por meio do framework de 12 etapas de Almeida (2013), aplicado ao problema de ranqueamento de alternativas de desenvolvimento em uma usina termelétrica a biomassa de cavaco de madeira. A estrutura adotada segue a sequência proposta por Almeida (2013), dividida em três fases: preliminar (etapas 1 a 5), modelagem de preferências e escolha do método (etapas 6 a 8) e finalização (etapas 9 a 12).

Conforme descrito na metodologia, as etapas 1 a 5 são comuns ao modelo desenvolvido por Sônego (2025) com o método PROMETHEE II, sendo aqui revisadas e reescritas com base nas definições de cada etapa do framework. A partir da etapa 6, são apresentadas as especificidades do método ELECTRE III, o que permite, ao final, a comparação entre os dois modelos.

4.1 Caracterização dos decisores e outros autores

O principal decisor e o responsável final pela escolha da alternativa estão relacionados a figuras de liderança; por isso, costumam ser CEOs, empresários e gestores. Apesar de muitas vezes ser uma pessoa única, o decisor, assim como os demais, pode ser um grupo, como um conselho. (ALMEIDA, 2013 e ROY, 1996)

O analista atua no papel de fortalecer as métricas e os aspectos técnicos do processo decisório, oferecendo suporte e análises que facilitam e detalham, com mais qualidade, as alternativas e os critérios. Outros agentes que contribuem nessa perspectiva mais técnica são os assessores e os especialistas. (ALMEIDA, 2013 e ROY, 1996)

Por fim, a figura do investidor (stakeholder) atua como um peso significativo na leitura dos interesses comerciais e de capital relacionados ao processo decisório, sempre trazendo a perspectiva de mercado para a decisão. (ALMEIDA, 2013 e ROY, 1996)

A escolha dos autores e dos decisores está diretamente relacionada ao local onde a decisão será executada. Como essa modelagem será desenvolvida em comparação com uma modelagem já realizada, os decisores e autores serão os mesmos descritos na pesquisa de Diego Sônego em 2025.

Para essa pesquisa, a ênfase recaiu diretamente sobre os resultados de geração de energia elétrica na unidade geradora, sendo, portanto, o principal decisor

o diretor industrial, devido ao seu conhecimento em operação e estratégia da companhia e ao seu potencial na tomada de decisões.

Os analistas da planta fortaleceram a análise de métricas e de aspectos técnicos dos dados com o apoio e a orientação do especialista, que, nesse modelo, era o gerente de operação de manutenção da planta.

O grupo de stakeholders principais é composto pelos acionistas, pela equipe de suprimentos e pela diretoria financeira, por serem os principais atores na análise das vantagens comerciais para a tomada de decisão.

A planta, por estar localizada em Roraima, opera isolada do Sistema Interligado Nacional (SIN), de modo que possui como stakeholders secundários a Roraima Energia, a distribuidora de energia elétrica local, a ANEEL e a ONS, empresas relacionadas que regulam, operam e viabilizam a distribuição da energia elétrica gerada pela usina.

4.2 Objetivos da decisão

Os objetivos são divididos por sua intenção, maximizar ou minimizar, e seguidos de uma breve descrição. Por exemplo, em um modelo decisório, o objetivo pode ser maximizar a geração de energia e, portanto, sua descrição seria aumentar o faturamento. Os objetivos são a base principal para a validação, a compreensão e a definição do propósito das demais etapas da metodologia. (ALMEIDA, 2013)

Desse modo, compreendem a intenção de resultados obtidos por meio da aplicação das alternativas escolhidas do MDCM, definidos pelo decisor; foram descritos no trabalho de Diego Sonogo. O objetivo principal dessa análise é melhorar o desempenho de uma usina termelétrica movida a biomassa de cavaco de madeira, aprimorando os indicadores ambientais e econômicos da usina. OS objetivos são sumarizados no Quadro 4.

Quadro 4 – Objetivos da decisão Multicritério

Objetivos da decisão	Aumentar a eficiência de conversão do combustível, buscando maior aproveitamento energético do insumo
	Elevar a eficiência hídrica do processo, promovendo o uso racional da água
	Ampliar a utilização da capacidade instalada

	Reduzir o consumo interno de energia elétrica
	Maximizar a energia líquida disponível para comercialização
	Mitigar perdas e ineficiências energéticas operacionais

Fonte: Adaptação do texto de Sônego (2025)

4.3 Critérios Estabelecidos

Para cada objetivo definido, é abordado um critério, de modo que os objetivos possam ser avaliados e validados por meio de parâmetros mensuráveis, sem sobreposições. E conforme definido por Almeida (2013), respeitando as propriedades fundamentais: não redundância, exaustividade e consistência. Neles são definidos: o tipo, os níveis, a unidade, a direção, a consequência natural e o tipo de escala do objetivo. Para a apresentação dessa etapa, constrói-se uma tabela que relaciona os critérios aos aspectos construtivos dos itens. (Almeida, 2013)

Tipo: Pode ser classificado como natural ou construído. Se for uma escala com unidade convencional como marcação temporal, financeira, física ou proporcional, é considerada natural. Já os critérios desenvolvidos especialmente para o sistema de medição são denominados critérios construídos. Nível: Limita os escalares de um critério de tipo construído, por exemplo: avaliação de satisfação de 1 a 5 (5 níveis). Unidade: unidade de medida dos critérios de tipo natural, como kg, kWh e m. Direção: se o propósito é maximizar ou minimizar. Consequência natural: determinística ou probabilística, ou seja, se é dependente ou não do estado de natureza

Os seis critérios adotados neste trabalho foram originalmente definidos por Sônego (2025), que os fundamentou em referências consolidadas na área de desempenho de plantas termoelétricas, especialmente em Moran *et al.* (2014), Abedin *et al.* (2024), Zamri *et al.* (2022) e Lin e Chen (2018).

Critério 1 (C1 – Biomassa/Energia Gerada): correlacionado com o objetivo de aumentar a eficiência de conversão do combustível em energia. Esse indicador avalia a eficiência na conversão térmica da biomassa em energia, por meio da divisão do peso do consumo de biomassa (em toneladas) pelo total de MW/h gerado. (ABEDIN *et al.*, 2024; MORAN *et al.*, 2014) Desse modo, é classificado como um critério técnico,

no qual quanto menor o seu valor, melhor o resultado da usina, sendo, portanto, um critério de minimização.

O Critério 2 (C2 – Água/Vapor Gerado) mede o volume de água necessário para produzir uma tonelada de vapor, expresso em metros cúbicos por tonelada (m^3/t). Esse indicador permite avaliar perdas no ciclo térmico, apoiar ajustes operacionais em caldeiras e planejar ações de eficiência hídrica (LIN; CHEN, 2018; MORAN et al., 2014). Por essa razão, relaciona-se ao objetivo de elevar a eficiência hídrica do processo, promovendo o uso racional da água. Sua direcionalidade também é de minimização, pois menores razões indicam menor desperdício de água no processo de geração de vapor.

O Critério 3 (C3 – Média da Potência Ativa/Potência Instalada) representa o fator de eficiência energética da planta, ou seja, a proporção entre a energia efetivamente gerada e a capacidade nominal instalada, e está diretamente relacionado ao objetivo de ampliar a utilização da capacidade instalada. Esse parâmetro, conhecido na literatura como fator de capacidade, reflete o grau de aproveitamento da infraestrutura disponível e é relevante para o planejamento operacional e para a comparação entre períodos (ABEDIN et al., 2024; MORAN et al., 2014). Indicar eficiência positiva é um critério de maximização.

O Critério 4 (C4 – Energia Consumida/Energia Gerada) representa o consumo parasitário da planta, ou seja, a fração da energia elétrica gerada consumida internamente por sistemas auxiliares da planta, sendo, desse modo, associado ao objetivo de reduzir o consumo interno de energia elétrica. Esse indicador é fundamental para avaliar a energia líquida da operação, uma vez que o consumo interno reduz a energia disponível para exportação (ABEDIN et al., 2024; MORAN et al., 2014). Sua unidade é (%) e sua direcionalidade de minimização.

O Critério 5 (C5 – Energia Exportada/Energia Gerada) mede a parcela da energia total gerada que é efetivamente exportada para a rede elétrica, descontado o consumo interno. Esse critério possui valor econômico, pois reflete diretamente o potencial de comercialização da produção da usina (ABEDIN et al., 2024; MORAN et al., 2014). Por representar o retorno energético e financeiro da operação, relaciona-se ao objetivo de maximizar a energia líquida disponível para comercialização, tendo como direcionalidade a maximização.

O Critério 6 (C6 – Perda Calculada/Energia Gerada) indica as perdas não contabilizadas no balanço energético da planta, expressas como a diferença

percentual entre a energia gerada e a soma dos fluxos de consumo interno e exportação (%). Essas perdas podem decorrer de limitações técnicas, dispersões térmicas, falhas de medição ou variações operacionais não rastreadas (ABEDIN et al., 2024; MORAN et al., 2014). Considerando isso, esse critério se vincula ao objetivo de mitigar perdas e ineficiências energéticas operacionais, justamente por refletir tais ineficiências; sua direcionalidade é a minimização.

Quadro 5 – Caracterização dos critérios

Critério	Und	Tipo	Papel na decisão	Direção	Descrição
Biomassa / Energia Gerada (C1)	t/MWh	Técnico	Eficiência de uso do combustível	Minimizar	Relação entre massa de biomassa utilizada e energia gerada.
Água / Vapor Gerado (C2)	m³/t	Técnico	Eficiência hídrica	Minimizar	Volume de água consumida por tonelada de vapor gerado.
Média da Potência Ativa / Potência Instalada (C3)	%	Técnico	Fator de uso da planta	Maximizar	Proporção da energia efetivamente gerada sobre a potência máxima.
Energia Consumida / Energia Gerada (C4)	%	Técnico	Eficiência interna (parasitária)	Minimizar	Fração da energia gerada consumida por sistemas auxiliares.
Energia Exportada / Energia Gerada (C5)	%	Técnico	Energia líquida comercializável	Maximizar	Porcentagem da energia que é efetivamente exportada para a rede.
Perda Calculada / Energia Gerada (C6)	%	Técnico	Perdas ocultas e ineficiências	Minimizar	Diferença não atribuída entre geração, consumo e exportação de energia.

Fonte: Sônego 2025

Além disso, em seu trabalho Sônego, apresentou tabelas com escalas de desempenho para os indicadores através de contato e discussão direta com o diretor industrial da planta. Essas escalas permitem ajustar os coeficientes e definir a matriz de desempenho nas etapas seguintes.

Quadro 6 – Escala de desempenho para critérios de minimização

Critério	Und	Nível 1 (Excelente)	Nível 2 (Bom)	Nível 3 (Regular)	Nível 4 (Baixo)	Nível 5 (Insatisfatório)
C1 Biomassa / Energia Gerada	t/MWh	$\leq 1,14$	$1,14 < x \leq 1,30$	$1,30 < x \leq 1,50$	$1,50 < x \leq 1,70$	$> 1,70$
C2 Água / Vapor Gerado	m³/t	$\leq 1,00$	$1,00 < x \leq 1,05$	$1,05 < x \leq 1,10$	$1,10 < x \leq 1,15$	$> 1,15$
C4 Energia Consumida / Energia Gerada	%	≤ 10	$10 < x \leq 15$	$15 < x \leq 18$	$18 < x \leq 20$	> 20
C6 Perda Calculada / Energia Gerada	%	$\leq 0,5$	$0,5 < x \leq 1$	$1 < x \leq 2$	$2 < x \leq 3$	> 3

Fonte: Sônego 2025

Quadro 7 – Escala de desempenho para critérios de maximização

Critério	Und	Nível 1 (Insatisfatório)	Nível 2 (Baixo)	Nível 3 (Regular)	Nível 4 (Bom)	Nível 5 (Excelente)
C3 – Média da Potência Ativa / Potência Instalada	%	< 60	$60 \leq x < 70$	$70 \leq x < 75$	$75 \leq x < 80$	$80 \leq x \leq 100$
C5 – Energia Exportada / Energia Gerada	%	< 77	$77 \leq x < 80$	$80 \leq x < 83$	$83 \leq x < 90$	$90 \leq x \leq 100$

Fonte: Sônego 2025

4.4 Espaço de ações e problemática

A quarta etapa do framework envolve a definição do espaço de ações e da problemática do modelo decisório. Conforme Almeida (2013), essa etapa é importante para dimensionar as linhas gerais do que se espera da decisão, caracterizando tanto o conjunto de alternativas disponíveis quanto a relação desejada entre elas.

O conjunto de alternativas analisadas neste trabalho é composto por seis soluções de transformação digital identificadas por Sônego (2025) por meio da metodologia PRISMA 2020, aplicada a bases de dados científicas para o levantamento de intervenções tecnológicas viáveis para usinas de geração a partir de biomassa.

A primeira alternativa escolhida foi A1 – Otimização do Uso de Água Industrial por meio da implementação de sistemas de monitoramento e controle, com o objetivo de reduzir o consumo hídrico no ciclo de geração de vapor. O monitoramento e o controle direto do sistema ajudam a identificar pontos de desperdício e a reduzir perdas. (LIN; CHEN, 2018 e MORAN et al., 2014)

A seguinte alternativa escolhida, A2 Biomassa com Maior Poder Calorífico, se relaciona a seleção e gestão de insumos com maior densidade energética, visando aumentar a eficiência de conversão térmica. A escolha desses substratos é definida por aspectos como a granulometria e a menor umidade. (EPE, 2022 e MORAN et al., 2014)

A terceira alternativa foi A3 Otimização Elétrica dos Sistemas; trata-se da revisão e melhoria dos sistemas elétricos internos da planta, com foco na redução do consumo parasitário e no aumento da energia exportada. Isso envolve tanto aspectos corretivos, como a avaliação dos gastos com equipamentos energéticos, quanto

aspectos preditivos, como a melhoria da programação de paradas inteligentes. (MORAN et al, 2014)

Visando à melhoria da operação do controle de energia, a alternativa A4 – Diagnóstico de Perdas Elétricas refere-se à adoção de ferramentas de monitoramento para a identificação e a redução de perdas elétricas não contabilizadas no balanço energético, tais como a eliminação de cargas em vazio e o balanceamento de carga. (ABEDIN et al., 2024; MORAN et al., 2014)

A seguinte alternativa, A5 – Digitalização e Sensoriamento, está relacionada à implementação de sensores e sistemas de coleta de dados em tempo real, constituindo, desse modo, um mecanismo de apoio à gestão e à operação da planta na tomada de decisões em tempo real e a longo prazo. (CARVALHOSA et al., 2024)

Por fim, a alternativa A6 – Manutenção Preditiva Baseada em Dados trata do uso de algoritmos e da análise de dados operacionais para antecipar falhas e otimizar os ciclos de manutenção. (CARVALHOSA et al., 2024)

O espaço de ações é discreto e estável, pois o conjunto de alternativas foi definido previamente e não se altera ao longo do processo decisório. Além disso, as alternativas são globalizadas, ou seja, cada uma exclui as demais no processo de ranqueamento e é avaliada de forma independente em relação aos critérios estabelecidos.

A problemática deste modelo é o ranqueamento (ordenação): busca-se estabelecer uma ordem de preferência entre as alternativas com base no desempenho delas nos critérios definidos. Essa problemática é compatível com a aplicação do método ELECTRE III, que produz uma ordenação final por meio de um processo de destilação ascendente e descendente.

4.5 Fatores não controlados

A quinta e última etapa da fase preliminar tem como objetivo identificar fatores externos ao domínio do decisor que possam influenciar os resultados do modelo. Conforme Almeida (2013), esses fatores correspondem ao que a literatura de teoria da decisão denomina estado da natureza, variáveis sobre as quais o decisor não tem controle direto, mas que podem afetar as consequências das alternativas avaliadas. Essa etapa identifica e delimita todos esses fatores que não estão sob o controle do

decisor, geralmente por questões numéricas ou por condições específicas das alternativas e dos critérios.

Primeiramente, a disponibilidade de biomassa regional pode variar ao longo do tempo e, por consequência, também a qualidade da biomassa, já que o poder calorífico do cavaco de madeira varia conforme a espécie, o teor de umidade e as condições de estocagem. Essas mudanças impactam diretamente a relação entre a massa de biomassa (em toneladas) e a energia gerada. Entretanto, não estão sob o controle direto do decisor industrial e dependem da sazonalidade. (TURSI, 2020; PEDIŠIUS *et al.*, 2021).

A demanda da região e as condições de despacho determinadas pela distribuidora local influenciam o despacho da usina e estão fora do controle do decisor, podendo afetar a média de potência ativa e a quantidade de energia exportada quando se exige a redução do despacho. (ANEEL, 2024; ONS, 2025)

Mudanças nas regulamentações e tarifas, sejam alterações nas normas da ANEEL ou nas condições tarifárias do mercado regional de energia elétrica, representam variáveis externas que podem modificar a atratividade relativa de cada alternativa sem que o decisor possa antecipar ou controlar tais mudanças. (ANEEL, 2024; ONS, 2025)

A identificação desses fatores não implica sua modelagem como critérios adicionais, mas sim a consciência de que os resultados do modelo refletem um cenário de referência e de que variações nessas condições podem demandar revisão das recomendações (ALMEIDA, 2013).

4.6 Modelagem das preferências

A etapa 6 inaugura a segunda fase do framework, dedicada à modelagem de preferências e à escolha do método multicritério. Conforme Almeida (2013), essa etapa deve ser desenvolvida de forma integrada às etapas 7 e 8, pois é o conjunto dessas três etapas que fornece os elementos centrais para a seleção e a parametrização do método.

A escolha do método multicritério é orientada, primeiramente, pela estrutura de preferências do decisor. Neste modelo, verificou-se que o decisor não opera com uma lógica estritamente compensatória, ou seja, não considera que um desempenho muito elevado em um critério possa compensar um desempenho muito baixo em

outro. Essa postura está alinhada com os métodos de sobreclassificação, que modelam preferências por meio da relação “pelo menos tão bom quanto” entre pares de alternativas, sem realizar agregação aditiva dos critérios (ALMEIDA, 2013; INMETRO, 2022).

O método selecionado para este trabalho é o ELECTRE III, cuja escolha se justifica por diversos aspectos. A priori, por ser um método não compensatório de sobreclassificação, coerente com a estrutura de preferências do decisor. Além disso, o método é especialmente indicado para problemas de ranqueamento em situações que envolvem imprecisão, incerteza ou inconsistência nos dados de entrada, contexto que se aplica à avaliação de alternativas com base em estimativas do decisor. Por fim, a escolha do ELECTRE III é motivada pelo objetivo comparativo central deste trabalho: comparar seus resultados com os obtidos pelo PROMETHEE II na pesquisa de Sônego (2025), por se tratarem de dois métodos de sobreclassificação com análise par a par, mas com diferenças estruturais relevantes quanto ao tratamento da incomparabilidade e ao uso de limiares de veto.

4.7 Avaliação intracritério

Na modelagem das preferências, serão explicadas questões gerais do modelo de decisão escolhido, como a estrutura de preferências a ser utilizada, a relação entre a escolha do método e as alternativas identificadas, e as condições matemáticas do modelo, por exemplo, se o modelo é compensatório ou não.

A avaliação intracritério é a que indica a relação entre critérios e alternativas, ou seja, os coeficientes de cada alternativa para cada critério, sendo, portanto, a principal base de dados para iniciar a análise. Por conta disso, os valores da análise de Sonêgo e dessa pesquisa são comuns. O decisor da planta avaliou as alternativas conforme os critérios, em escala de 0 a 10, permitindo validar a influência e o impacto de cada alternativa analisada sobre o critério definido. Para referência o decisor utilizou as escalas de desempenho de critérios (Quadros 6 e 7).

Considerando que o PROMETHEE II adapta os critérios para que todos os seus coeficientes sejam convertidos em maximização, o que representa uma grande vantagem comparativa, já que o ELECTRE III também exige esse modelo de maximização

Nessa etapa, comprova-se a importância da expertise e do conhecimento técnico dos decisores, pois são diretamente responsáveis pela qualidade técnica da numeração desses parâmetros. O resultado consolidado é o Quadro 8.

Quadro 8 – Matriz de Desempenho: relação entre critérios e alternativas

	C1 - Biomassa/ Energia Gerada	C2 - Água /Vapor	C3 - Média da Potência Ativa / Potência Instalada	C4 - Consumo Interno (Energia consumida/ Energia Gerada)	C5 -Energia Exportada/Energia Gerada	C6 - Perda Calculada/Energia gerada
A1 -Otimização do Uso de Água Industrial	0	9	0	0	0	5
A2 - Biomassa com Maior Poder Calorífico	10	0	3	0	3	0
A3 -Otimização Elétrica dos Sistemas	0	0	0	8	9	8
A4 -Diagnóstico de Perdas Elétricas	0	0	0	9	2	9
A5 - Digitalização e Sensoriamento	0	0	7	0	7	8
A6 - Manutenção Preditiva Baseada em Dados	0	0	8	8	7	6

Fonte: Adaptado de Sônego (2025)

Para o método PROMETHEE II, a matriz de desempenho já é suficiente para a avaliação intracritério. Entretanto, no Electre III, ainda precisam-se obter mais informações do decisor, a saber: os coeficientes de preferência, de indiferença e de veto.

A estrutura de preferências do ELECTRE III utiliza a relação quaternária (P, Q, I, R), que incorpora, além da preferência estrita (P) e da indiferença (I), a preferência fraca (Q) e a incomparabilidade (R). Essa estrutura é mais rica do que a relação binária (P, I) dos métodos compensatórios, pois permite representar situações em que o decisor não consegue comparar claramente duas alternativas, o que é comum em avaliações de alternativas tecnológicas com múltiplos critérios em unidades distintas (ALMEIDA, 2013; FIGUEIRA; ROY, 2005).

A operacionalização dessa estrutura de preferências no ELECTRE III é realizada por meio de três limiares definidos pelo decisor para cada critério: o limiar de indiferença (q), o limiar de preferência (p) e o limiar de veto (v).

Por meio de reunião formal o decisor classificou os limiares como comuns a todos os critérios: 1 de indiferença, 2 de preferência e sem veto. O motivo do modelo não ter veto foi justamente que, na matriz de desempenho, cada critério teve um correspondente zero em pelo menos uma das alternativas. O risco de um critério ser considerado automaticamente superior a outro pelo critério de veto não estava alinhado às necessidades da planta. Essa posição pelo decisor buscou evitar, por exemplo, que A1 fosse desclassificada automaticamente em relação a A2 pelo fato de seu C1 ser igual a zero. Desse modo, os vetores dos limiares de Indiferença, Preferência e Veto foram definidos como:

$$LQ = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

$$LP = [2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2]$$

$$LV = [- \ - \ - \ - \ - \ -]$$

4.8 Avaliação intercritério

A avaliação intercritérios define o peso de cada critério no escopo da decisão. Para a análise em Promethee II, o decisor foi orientado a ordenar os critérios segundo sua importância e seu impacto no desempenho da usina, sem necessidade de definir valores específicos.

Na sequência, Sônego calculou os pesos de ordenação pelo método ROC. Esse método, apresentado por Barron em 1992, utiliza uma expressão matemática que calcula o peso relativo do critério em função de sua posição. Nela, W_i representa o peso do critério na posição i , considerando a quantidade total de critérios n , e j percorre todos os valores de i até n . Coeficientes consolidados pela equação 16 e Tabela 1

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{j} \quad (16)$$

Tabela 1 – Ordenação dos critérios conforme impacto pelo decisor

Posição	Critério	Peso ROC
1º Lugar	C1 - Biomassa/Energia Gerada	0,4083
2º Lugar	C2 - Água/ Vapor	0,2417
3º Lugar	C5 - Energia Exportada/Energia Gerada	0,1538
4º Lugar	C3 - Média da Potência Ativa / Potência Instalada	0,1083
5º Lugar	C4 - Consumo Interno (Energia consumida/ Energia Gerada)	0,0611
6º Lugar	C6 - Perda Calculada/Energia gerada	0,0278

Fonte: Adaptado de Sônego (2025)

A aplicação do ELECTRE III manterá os coeficientes de peso, justamente para preservar e respeitar a comparação.

4.9 Avaliação das alternativas pelo ELECTRE III

Utilizando a base comum do PROMETHEE II, foi possível estruturar o MDMC de modo que as mesmas informações fossem comparadas por meio de métodos distintos, de forma eficiente.

Nessa etapa, a aplicação oficial do modelo decisório é realizada; portanto, todas as subetapas envolvem a aplicação do ELECTRE III.

Também é nessa etapa que são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do método multicritério. Para aplicar o ELECTRE III, foi desenvolvido um algoritmo computacional, conforme as equações descritas nas seções 3.4.1 e 3.4.6, que resultou na classificação final das alternativas.

4.9.1 Obter a matriz de Concordância

A primeira etapa do processo consistiu em obter a matriz de concordância. Por meio das equações (7-9), obtiveram-se os coeficientes de preferência parcial, denominados no código ICJ parcial, que, combinados pela equação (10), formaram a Matriz de Concordância final.

Como exemplo, descrevem-se as etapas para chegar ao coeficiente $A(5,6)$, ou seja, o índice da matriz de concordância da sobreclassificação de A5 em relação a A6.

$$A5 = [0 \ 0 \ 7 \ 0 \ 7 \ 8]$$

$$A6 = [0 \ 0 \ 8 \ 8 \ 7 \ 6]$$

Comparações:

No critério 1 $g(A5) = 0$ $g(A6) = 0$

$g_6(0) - g_5(0) = 0$ como $\leq Q_1$ (1)

$C_{1(5,6)} = 1$

No critério 2 $g(A5) = 0$ $g(A6) = 0$

$g_6(0) - g_5(0) = 0$ como $\leq Q_2$ (1)

$C_{2(5,6)} = 1$

No critério 3 $g(A5) = 7$ $g(A6) = 8$

$g_6(8) - g_5(7) = 1$ como $\leq Q_3$ (1)

$C_{3(5,6)} = 1$

Nesse critério a diferença por ser exatamente igual ao limiar de indiferença considera que não existe sobreclassificação de A6 sobre A5 no critério A3

No critério 4 $g(A5) = 0$ $g(A6) = 8$

$g_6(8) - g_5(6) = 8$ como $> P_4$ (2)

$C_{4(5,6)} = 0$

No critério 5 $g(A5) = 7$ $g(A6) = 7$

$g_6(7) - g_5(7) = 0$ como $\leq Q_5$ (1)

$C_{5(5,6)} = 1$

No critério 6 $g(A5) = 7$ $g(A6) = 7$

$g_6(6) - g_5(8) = -2$ como $\leq Q_6$ (1)

$C_{6(5,6)} = 1$

$$C(5,6) = \frac{1 \cdot 0,4083 + 1 \cdot 0,2417 + 1 \cdot 0,1083 + 0 \cdot 0,0611 + 0 \cdot 0,1583 + 1 \cdot 0,0278}{0,4083 + 0,2417 + 0,1083 + 0,0611 + 0,1583 + 0,0278}$$

$$C(5,6) = 0,7818$$

Esse processo foi repetido para cada um dos pares de alternativas e por fim se obteve a matriz de concordância (Quadro 9).

Quadro 9 – Matriz de Concordância

	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	1,0000	0,3757	0,8039	0,8039	0,7542	0,6741
A2	0,7320	1,0000	0,8039	0,8646	0,7542	0,6464
A3	0,7596	0,4365	1,0000	1,0000	0,8426	0,8426
A4	0,7596	0,4365	0,9392	1,0000	0,7818	0,7818
A5	0,7596	0,5939	0,8315	0,8923	1,0000	0,8923
A6	0,7596	0,5939	0,9116	0,9724	0,9724	1,0000

Fonte: Autoria Própria (2026)

4.9.2 Obter a Matriz de Discordância

A Matriz de Discordância está relacionada aos critérios com limiares de veto. É aplicado um modelo semelhante a uma penalização para garantir que nenhuma alternativa vetada por outra fique acima dela na classificação final. Como o decisor optou por não adotar limiares de veto, nesse modelo não terá Matriz de Discordância.

4.9.3 Matriz de Credibilidade

A Matriz de Credibilidade tem como objetivo unir os coeficientes da Matriz de Concordância aos da Matriz de Discordância. Nesse caso, na ausência de Matriz de Discordância, a Matriz de Credibilidade (quadro 10) é igual à da Matriz de Concordância.

Quadro 10 – Matriz de Credibilidade

	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	1,0000	0,3757	0,8039	0,8039	0,7542	0,6741
A2	0,7320	1,0000	0,8039	0,8646	0,7542	0,6464
A3	0,7596	0,4365	1,0000	1,0000	0,8426	0,8426
A4	0,7596	0,4365	0,9392	1,0000	0,7818	0,7818
A5	0,7596	0,5939	0,8315	0,8923	1,0000	0,8923
A6	0,7596	0,5939	0,9116	0,9724	0,9724	1,0000

Fonte: Autoria Própria (2026)

4.9.4 Destilação Descendente

O processo de destilação descendente consiste em ordenar as alternativas da melhor à pior. Para tal, é necessário desconsiderar os coeficientes da matriz diagonal principal, para os quais foi adotado o valor 0. Na sequência, foi identificado o maior valor da matriz e adotada a fórmula 5 para determinar o λ de corte. Todos os termos inferiores ao corte na matriz são convertidos em 0, enquanto os superiores são convertidos em 1. Por fim, realiza-se a subtração das somas de cada coluna em relação a cada linha, sendo o termo com a maior soma considerado o primeiro da classificação. A seguir se apresenta um exemplo da primeira iteração descendente.

- a) Transforma-se a matriz diagonal principal em zero

Quadro 11 – Matriz de Concordância com diagonal zero

	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	0,0000	0,3288	0,7542	0,7542	0,7072	0,6741
A2	0,7320	0,0000	0,7542	0,9116	0,7072	0,6464
A3	0,7596	0,4862	0,0000	1,0000	0,8923	0,8923
A4	0,7596	0,4862	0,8426	0,0000	0,7349	0,7349
A5	0,7596	0,5939	0,7818	0,9392	0,0000	0,9392
A6	0,7596	0,5939	0,8149	0,9724	0,9724	0,0000

Fonte: Autoria própria (2026)

- b) Se extraí o coeficiente máximo da matriz remanescente sendo 1 em MC(3,4)

- c) Se calcula o λ de corte

$$S = 0,3 - \text{AlphaMax} * 0,15$$

$$S = 0,3 - 1 * 0,15 = 0,15$$

$$\text{AlphadeCorte} = \text{AlphaMax} - S$$

$$\text{AlphadeCorte} = 1 - 0,3 = 0,85$$

- d) Iguala-se a 1 todos os termos maiores a 0,85 na matriz, enquanto define-se como zero todos os coeficientes menores que 0,85. Obtendo a matriz:

Quadro 12 – Matriz determinada pelo coeficiente de corte

	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	0	0	0	0	0	0
A2	0	0	0	1	0	0
A3	0	0	0	1	1	1
A4	0	0	0	0	0	0
A5	0	0	0	1	0	1
A6	0	0	0	1	1	0

Fonte: Autoria própria (2026)

e) Calcula-se a soma das colunas e linhas

Quadro 13 – Soma das linhas e colunas da matriz

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Soma das linhas
A1	0	0	0	0	0	0	0
A2	0	0	0	1	0	0	1
A3	0	0	0	1	1	1	3
A4	0	0	0	0	0	0	0
A5	0	0	0	1	0	1	2
A6	0	0	0	1	1	0	2
Soma das colunas	0	0	0	4	2	2	

Fonte: Autoria própria (2026)

f) Realiza-se a subtração entre as linhas e colunas de uma mesma alternativa.

$$A1C - A1L = 0$$

$$A2C - A2L = 1$$

$$A3C - A3L = 3$$

$$A4C - A4L = -4$$

$$A5C - A5L = 0$$

$$A6C - A6L = 0$$

A alternativa cuja subtração resulte no maior valor é escolhida como a primeira posição do nosso ranking descendente; nesse caso, A3. Na sequência, a linha e a coluna de A3 são removidas da matriz de credibilidade e o processo de destilação é recomeçado com as 5 alternativas restantes.

Esse processo foi repetido até chegar à configuração da classificação final. Em alguns termos em que houve empates entre alternativas, realizou-se um desempate entre as alternativas empatadas; ainda assim, em alguns casos, ocorreu incomparabilidade. Esse ranqueamento é consolidado na Tabela 2.

Tabela 2 – Ordenação das alternativas na classificação Descendente

Posição	Alternativa
1º Lugar	A3
2º Lugar	A2, A5 e A6
3º Lugar	A1 e A4

Fonte: Autoria própria (2026)

4.9.4 Destilação Ascendente

O processo de destilação descendente foi realizado com a mesma metodologia, com a diferença de que, em vez de pegarmos o valor máximo, pega-se a subtração, com resultado mínimo, e preenche-se a posição inferior primeiro.

Considerando o mesmo exemplo da destilação ascendente, o valor com a menor subtração foi a alternativa 4; portanto, ela ocupa a base do nosso ranking. Essa mesma alternativa tem a coluna e linha removidas da matriz de credibilidade para a iteração seguinte. O ranqueamento da destilação Ascendente está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Ordenação das alternativas na classificação Ascendente

Posição	Alternativa
1º Lugar	A2
2º Lugar	A1 e A3
3º Lugar	A5 e A6
4º Lugar	A4

Fonte: Autoria própria (2026)

4.9.5 Classificação final

A classificação final do ELECTRE III foi construída pela interseção dos rankings “Descendente” e “Ascendente”, considerando a ordem de preferência das

alternativas. Com a realização desse passo, foi possível obter o ranking e o resultado do MDCM.

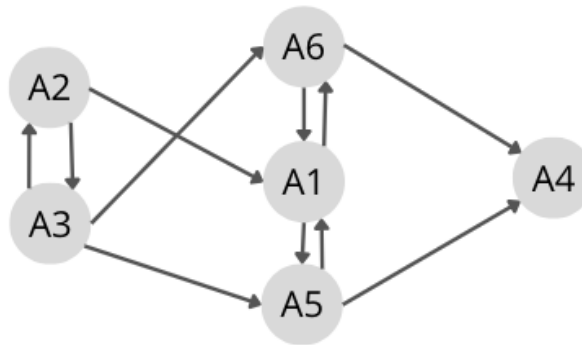
A fim de tornar mais visual a sobreclassificação entre as alternativas, foi construído um diagrama de preferência entre elas (Figura 8), semelhante ao apresentado por Roy (1996).

Figura 7 – Relação gráfica de preferência de alternativa genérica A_i e A_j



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 8– Relação de preferência das alternativas analisadas no MDCM



Fonte: Autoria própria (2026)

É importante lembrar que, dentro do modelo ELECTRE III, duas alternativas ocuparem o mesmo nível não significa que elas são iguais, mas sim que a diferença entre elas não torna possível uma sobreclassificação evidente pelo método. A Tabela 4 apresenta o ranqueamento final das alternativas e resultado da aplicação do ELECTRE III.

Tabela 4 – Classificação final das alternativas pelo ELECTRE III

Posição	Alternativa
1º Lugar	A2 e A3
2º Lugar	A1, A5 e A6
3º Lugar	A4

Fonte: Autoria própria (2026)

4.10 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade constitui uma etapa complementar aos métodos de decisão multicritério, sendo utilizada para avaliar a robustez e a estabilidade dos resultados obtidos. Dessa forma, a análise de sensibilidade contribui para a validação dos resultados e para uma compreensão mais aprofundada do comportamento do método multicritério aplicado. (ALMEIDA, 2013)

Nessa etapa, são promovidas alterações nos parâmetros do modelo: nos pesos dos critérios e nos coeficientes da Matriz de Desempenho, para avaliar a influência dessas variações na classificação final. Por meio dessa análise, é possível identificar os fatores de maior impacto no processo decisório e avaliar a confiabilidade do ranking gerado.

4.10.1 Análise de Sensibilidade por peso dos critérios

A primeira análise de sensibilidade foi realizada por meio de um método iterativo que ajustou os pesos dos critérios. Para tal, um critério por vez foi alterado com um incremento de 1% nos valores entre – 20% e +20% em relação ao seu valor original, excluindo o cenário de 0% de alteração, enquanto os demais 5 critérios foram normalizados em uma escala de soma 1, a fim de preservar a ordem de preferência entre eles. (MARESCHAL, 1988; Almeida, 2013)

Dos 240 cenários testados, 82,5% mantiveram o ranking original. E dos 42 casos com alteração de ranking, todos tiveram um ranking novo comum e, desses, apenas 9 estão dentro das variações de peso entre – 10% e 10%, o que indica que o modelo é estável para perturbações pequenas e moderadas. A tabela 5 apresenta os tipos de ranking e total de vezes que eles apareceram na análise de sensibilidade.

Tabela 5 – Rankings e ocorrências na análise de sensibilidade 1

Posição	R1	R2
1º Lugar	A2 e A3	A2, A3 e A6
2º Lugar	A1, A5 e A6	A1 e A5
3º Lugar	A4	A4
Ocorrências	198	42
Percentual	82,5%	17,5%

Fonte: Autoria própria (2026)

A tabela apresenta a informação significativa de que A2 e A3 estão sempre na primeira posição e, portanto, são fortemente válidas como as melhores alternativas para a planta. Por outro lado, a alternativa A4 ficou em último lugar em todos os rankings, o que evidencia uma despriorização definitiva na ordem de prioridade.

Além disso, alguns critérios se mostraram mais sensíveis do que outros, em termos de total de rankings com desvio, sendo os mais sensíveis C1, C2 e C5. Isso é completamente lógico, considerando que C1 e C2 influenciam diretamente a sobreclassificação e a força das alternativas 2, com C1 igual a 10 e C2 igual a 9, em relação às demais alternativas (A3 a A6), que possuem tanto C1 quanto C2 iguais a zero.

Ademais, C5 é o segundo critério com maior peso e possui coeficientes positivos em 5 das 6 alternativas, sendo assim um critério essencial para distinguir a sobreclassificação entre alternativas. A alteração de seu peso acaba por influenciar esses limites, tornando o sistema mais instável. O total de rankings com desvio por critério alterado está sumarizado na Tabela 6

Tabela 6 – Critério por total de rankings com desvio

Critério Alterado	Casos de Ranking com desvio
C1	14
C2	11
C3	0
C4	0
C5	17
C6	0

Fonte: Autoria Própria

4.10.2 Análise de Sensibilidade por valores da matriz de desempenho

A segunda análise de sensibilidade realizada avaliou a robustez do ranking final por meio da variação iterativa dos coeficientes da matriz de desempenho, alterando, por vez, todos os termos relacionados a um mesmo critério, em incrementos de 1% no intervalo de $\pm 20\%$ em relação aos seus valores originais (MUKHAMETZYANOV; PAMUCAR, 2018).

Dos 240 cenários testados, 221 mantiveram o ranking original, o que resulta em 92,1% de robustez global. Em todos os 19 cenários em que houve alteração de ranking, a alteração estava relacionada ao critério C5. Assim como na análise anterior,

provou-se o critério mais sensível e crítico, especialmente na análise de sobreclassificação dos termos.

Além disso, novamente, A2 e A3 ocuparam sempre a primeira posição no ranking, enquanto A4 sempre ficou na última. Desse modo, se fortaleceram ainda mais os resultados de preferência de A2 e A3 e a de preferência de A4. A tabela 7 apresenta os tipos de ranking e total de vezes que eles apareceram na análise de sensibilidade.

Tabela 7– Rankings e ocorrências na análise de sensibilidade 2

Posição	R1	R2	R3
1º Lugar	A2 e A3	A2, A3 e A6	A1, A2, A3, A5 e A6
2º Lugar	A1, A5 e A6	A1 e A5	A4
3º Lugar	A4	A4	
Ocorrências	221	10	9
Percentual	92,1%	4,2%	3,7%
Taxa de Variação do C5	-	de -11% a -2%	de -20% a -12%

Fonte: Autoria própria (2026)

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Esse capítulo está orientado para a análise dos resultados incluindo: o ranqueamento final do ELECTRE III, as análises de sensibilidade e a comparação com os resultados do PROMETHEE II

5.1 Resultados do ELECTRE III

A construção e o desenvolvimento do MDCM foram realizados respeitando o modelo de Almeida e mantendo os dados do modelo Promethee II de Sonêgo. A aplicação do ELECTRE III produziu uma classificação final com três níveis de preferência, posicionando as alternativas A2 (Biomassa com Maior Poder Calorífico) e A3 (Otimização Elétrica dos Sistemas) no primeiro lugar, seguidas por A1 (Otimização do Uso de Água Industrial), A5 (Digitalização e Sensoriamento) e A6 (Manutenção Preditiva Baseada em Dados) no segundo nível; e, por fim, no 3º nível, A4 (Diagnóstico de Perdas Elétricas).

No primeiro nível, A2 domina nos critérios de maior peso (C1 e C2), enquanto A3 concentra sua força nos critérios elétricos (C4, C5 e C6); o que impede a sobreclassificação de uma sobre a outra de forma conclusiva. Já A4 não apresenta desempenho superior a nenhuma alternativa em nenhum dos critérios de peso relevantes, sendo dominada especialmente por A3 e A6 nos critérios elétricos.

As duas análises de sensibilidade reforçaram essas conclusões. Na primeira, foi testada a mudança do peso dos critérios e, em 82,5% dos 240 cenários, o ranking se manteve exatamente igual. Mesmo nos casos em que houve discordância, as posições de A2 e A3 no topo e de A4 no último nível permaneceram inalteradas. Na segunda análise de sensibilidade, realizada com alterações na matriz de desempenho, o ranking original se manteve em 92,1% dos 240 cenários. E, mesmo nos casos de variação do ranking, obteve 100% dos casos com A2 e A3 na primeira posição e A4 na última.

Os critérios C1 e C2 foram bastante sensíveis na primeira análise, por serem os de maior peso e por apresentarem muitos zeros nos índices. Além disso, em ambas as análises, o critério C5 foi o mais sensível por ser o terceiro de maior peso, com concentrações de desempenho próximas em vários critérios.

De modo geral, a aplicação do método foi bem-sucedida e produziu resultados consistentes e estáveis. Entretanto, a soberania conjunta de A2 e A3 no primeiro nível

merece uma leitura mais cuidadosa. Essa coliderança reflete uma característica estrutural do ELECTRE III, pois as duas alternativas apresentam perfis complementares e sem sobreclassificação evidente entre si; o método registra isso como incomparabilidade.

A alternativa A2 concentra sua força quase inteiramente em C1, que possui o maior peso do modelo (0,4083); desse modo, garante uma posição de destaque independentemente do desempenho nos demais critérios. Porém, ao se observar o C5 Energia Exportada/Energia Gerada, A2, que pontuou 3 nesse critério, apresenta valor consideravelmente inferior ao de A3, que pontuou 9.

Essa limitação na distinção entre A2 e A3 está diretamente relacionada à natureza não compensatória do ELECTRE III. Por não realizar agregação aditiva dos critérios, o método impede que o desempenho excepcional de A2 em C1 compense o desempenho inferior de A2 em C5, e vice-versa para A3. Isso é estruturalmente correto do ponto de vista da lógica de sobreclassificação, pois não permite trocas entre critérios de naturezas distintas. Essa característica amplia a zona de incomparabilidade entre alternativas com perfis complementares como A2 e A3, tornando o método mais conservador na diferenciação entre elas.

Resultados mais assertivos sobre a soberania de uma alternativa em relação a outra poderiam ser obtidos com a incorporação de critérios adicionais ao modelo ou com uma análise mais aprofundada de C1 e C5, com base em dados históricos de longo prazo da usina.

A presença de muitos zeros na matriz de desempenho também é um aspecto sensível, pois torna contraintuitiva a escolha de limiares de veto, que poderiam gerar sobreclassificações sintéticas de uma alternativa em relação à outra. Sendo os limiares de veto uma das estratégias do ELECTRE III para reduzir termos de incomparabilidade, a sua ausência dificultou justamente esse aspecto.

A inclusão de um novo critério, como o custo estimado no primeiro ano da transformação, poderia ser eficiente para tratar essas incomparabilidades, já que não poderia ser zero em nenhuma das alternativas e poderia ter um veto consciente, por exemplo, o limite orçamentário da usina.

5.2 Comparação do ELECTRE III e PROMETHEE II

Esse capítulo destina-se à comparação final dos resultados do ELECTRE III, equivalente ao item 11 do modelo de Almeida, com a adição não tradicional de uma comparação ao ranking do PROMETHEE II. A Tabela 8 apresenta a comparação dos ranqueamentos finais dos dois modelos.

Tabela 8– Ranking final do ELECTRE III e do PROMETHEE II

Posição	ELECTRE III	PROMETHEE II
1º Lugar	A2 e A3	A2
2º Lugar	A1, A5 e A6	A6
3º Lugar	A4	A3
4º Lugar		A5
5º Lugar		A1
6º Lugar		A4

Fonte: Autoria própria (2026)

A comparação entre os rankings produzidos pelos dois métodos revela convergência nos extremos e divergências no grupo intermediário. Ambos os métodos posicionaram A2 no topo da classificação e A4 na última posição, o que reforça a validade dessas conclusões independentemente do método adotado.

A principal divergência está na posição de A6, que no PROMETHEE II ocupa o segundo lugar isolado, enquanto no ELECTRE III é agrupada no segundo nível, junto com A1 e A5, sem sobreclassificação evidente em relação a essas alternativas e subclassificada de A3.

A principal razão disso é o método operativo do sistema. A soma do PROMETHEE II no fluxo líquido é mais direta e avalia a soberania de um coeficiente sobre o outro, somando-os. Já no ELECTRE, a soberania é dada pelo ranqueamento dentro dos limites aceitos do sistema, o que separa critérios diferentes de maneira mais incisiva. Ou seja, o PROMETHEE II combina informações, priorizando sempre o ranqueamento, enquanto o ELECTRE III prioriza a análise de todos os pares como termos próprios, mesmo que isso implique incomparabilidade entre alternativas.

Para avaliar mais profundamente essa comparação, a análise de sensibilidade realizada no ELECTRE III foi replicada no PROMETHEE II, que apresentou robustez de 100% tanto no cenário de alteração dos pesos quanto no de alteração dos coeficientes da matriz. A robustez do PROMETHEE II reflete a natureza contínua do

score líquido, já que variações de peso deslocam os fluxos proporcionalmente, sem necessariamente alterar a sequência original.

Enquanto isso, o ELECTRE III mostrou variações de 17,5% e 8,1% nos cenários estudados, pois seu processo de destilação opera com limiares de corte; ou seja, pequenas variações de peso podem fazer alternativas cruzarem esses limiares, alterando as relações de sobreclassificação. Isso não representa fragilidade do modelo, mas sim que ele é mais conservador ao determinar a soberania de uma alternativa sobre a outra.

Esses resultados também ajudam a identificar prioridades na escolha do modelo mais adequado, de acordo com as necessidades do sistema analisado. Em plantas cuja ação precisa ser rápida, a comunicação do PROMETHEE II é mais objetiva e intuitiva. Além do algoritmo em si ser mais simples, o resultado com ranqueamento sem incomparabilidades pode ser uma forma mais ágil e prática.

Por outro lado, o ELECTRE III trouxe argumentos comparativos e analíticos críticos, como a sensibilidade do critério A5 e a dificuldade de comparabilidade de alternativas muito distintas no escopo dos critérios escolhidos. Desse modo, essa análise pode sugerir revisões ou estudos mais aprofundados.

Realizar o estudo do modelo de decisão por dois métodos diferentes indicaram ser uma estratégia interessante para ajudar a identificar disparidades teóricas e práticas, além de utilizar essas diferenças como oportunidade de realizar uma análise mais ampla antes da tomada de decisão.

Desse modo, avaliou-se que mesmo em modelos robustos, a adoção de mais de um método de decisão é uma ferramenta eficiente para uma escolha final mais assertiva. Ademais, essa comparação evidencia a importância de sempre adotar o método de acordo com as prioridades da planta analisada e reforça o valor do conhecimento do decisor na construção do modelo.

5.3 Implementação da decisão

A implementação da decisão sugerida pelos modelos consistiu na prioridade à adoção da alternativa A2 – Biomassa com Maior Poder Calorífico, por ter sido a primeira opção em ambos os modelos. Essa medida demanda da equipe local a revisão dos critérios de recebimento e de qualificação da matéria-prima, incluindo ajustes nos procedimentos de amostragem e a eventual renegociação com

fornecedores, de modo a garantir o fornecimento contínuo de biomassa dentro das especificações energéticas desejadas.

Na sequência, conforme o orçamento disponível, a planta deve adotar as medidas das alternativas A3 – Otimização Elétrica dos Sistemas de Utilidades e A6 – Manutenção Preditiva Baseada em Dados, devido às suas altas colocações em ambas as análises. A implementação da alternativa A3 requer que a equipe de engenharia e manutenção identifique pontos de ineficiência energética e atue em intervenções, como o balanceamento de cargas e a substituição de equipamentos obsoletos por modelos de maior eficiência. Já a alternativa A6 demanda um esforço estruturado de coleta e tratamento de dados operacionais dos equipamentos críticos, envolvendo a instalação ou integração de sensores, a definição de indicadores-chave de desempenho (KPIs) e a capacitação da equipe de manutenção para interpretar os dados e atuar preventivamente antes da ocorrência de falhas.

Sendo essas três alternativas principais do ranking complementares e não conflitantes, a adoção conjunta e sequencial tende a ser benéfica, permitindo que os ganhos obtidos por uma reforcem os resultados das demais. Para viabilizar essa implementação, recomenda-se que a equipe local estabeleça um cronograma de execução e alocação de recursos técnicos e financeiros. Por fim, é fundamental que a usina realize o monitoramento contínuo das métricas operacionais, comparando os resultados antes e após a adoção das estratégias, a fim de comprovar e avaliar o sucesso da decisão multicritério e garantir o registro de possíveis falhas e de novas necessidades da usina.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho aplicou o método de decisão multicritério ELECTRE III para o ranqueamento de alternativas de melhoria em uma usina termelétrica a biomassa de cavaco de madeira e realizou uma comparação metodológica com o PROMETHEE II, com base em um estudo de caso real. O processo decisório foi estruturado conforme o Framework de 12 Etapas de Almeida (2013), garantindo a coerência e o potencial de replicação do modelo desenvolvido.

Na fundamentação teórica, o trabalho contextualizou a relevância das bioenergias no cenário energético global e brasileiro, com destaque para o cavaco de madeira como substrato de crescente importância na matriz térmica nacional. Foram apresentados o panorama dos métodos de decisão multicritério, com ênfase nos métodos de sobreclassificação não compensatória, e o Framework em 12 Etapas como ferramenta para a organização e o desenvolvimento de modelos decisórios. A revisão do estado da arte evidenciou lacunas na aplicação de MCDM em problemas de melhoria e de gestão industrial de usinas de biomassa, nos quais esse trabalho buscou atuar diretamente.

A modelagem do ELECTRE III foi realizada de forma completa, respeitando todas as etapas do framework: caracterização dos decisores, definição de objetivos e critérios, estabelecimento do espaço de ações, identificação dos fatores não controlados, modelagem das preferências, com definição dos limiares de indiferença e de preferência, avaliação intracritério e intercritério, e construção da classificação final. O ranking obtido posicionou as alternativas A2 - Biomassa com Maior Poder Calorífico e A3 - Otimização Elétrica dos Sistemas, no primeiro nível de preferência, seguidas por A1 - Otimização do Uso de Água Industrial, A5 - Digitalização e Sensoriamento e A6 - Manutenção Preditiva Baseada em Dados no segundo nível, e A4 - Diagnóstico de Perdas Elétricas no último.

A robustez desses resultados foi validada por meio de duas análises de sensibilidade. Na primeira, com variação dos pesos dos critérios, 82,5% dos 240 cenários testados mantiveram o ranking original. Na segunda, com variação dos coeficientes da matriz de desempenho, a estabilidade atingiu 92,1%. Em ambas, A2 e A3 permaneceram sempre no primeiro nível e A4, no último, o que reforça a confiabilidade dessas posições, independentemente de perturbações nos parâmetros.

O critério C5 mostrou-se o mais sensível em ambas as análises, enquanto C3, C4 e C6 não alteraram o ranking.

A análise comparativa com o PROMETHEE II revelou convergência nos extremos; ambos os métodos posicionaram A2 no topo e A4 na última posição. Entretanto, observaram-se divergências no grupo intermediário, especialmente quanto às posições de A6 e A3. Essas diferenças foram atribuídas às distinções estruturais entre os dois métodos: o PROMETHEE II agrega os critérios por meio de fluxos líquidos contínuos, produzindo um ranking completo e sem incomparabilidades, enquanto o ELECTRE III opera por sobreclassificação par a par com limiares de corte, resultando em um modelo mais conservador diante de alternativas com perfis complementares. A análise de sensibilidade replicada no PROMETHEE II evidenciou robustez de 100% nos cenários testados, o que não indica superioridade de um método sobre o outro, mas sim que o ELECTRE III é mais sensível aos pesos dos limiares, característica relacionada à sua lógica de destilação.

A partir dessa análise, foi possível responder à questão introdutória da pesquisa: *“O ELECTRE III e o PROMETHEE II produzem ranqueamentos convergentes para o mesmo conjunto de alternativas de melhoria e critérios de desempenho de uma usina termelétrica a biomassa?”*. Os resultados indicaram que houve convergência parcial e não absoluta entre os métodos. Nesse contexto, a utilização combinada de ambas as abordagens se mostrou vantajosa, pois proporcionou uma análise mais rica e detalhada das alternativas de melhoria para a usina.

Dessa forma, com base nos ranqueamentos obtidos e nas análises de sensibilidade realizadas, definiu-se como prioridade a adoção da alternativa A2 – Biomassa com Maior Poder Calorífico. Adicionalmente, recomenda-se que essa iniciativa seja complementada, em sequência, pelas alternativas A3 – Otimização Elétrica dos Sistemas de Utilidades e A6 – Manutenção Preditiva Baseada em Dados.

Como limitações do trabalho, destaca-se a ausência de limiares de veto no modelo ELECTRE III. Essa decisão foi tecnicamente justificada pela concentração de zeros na matriz de desempenho, que tornaria o uso de veto inadequado ao contexto da planta. Entretanto, ela ampliou a zona de incomparabilidade entre alternativas com perfis complementares, como A2 e A3, o que impede uma distinção mais precisa entre elas. A inclusão de critérios adicionais, como o custo estimado de implementação no

primeiro ano, poderia reduzir essa incomparabilidade, ao garantir coeficientes não nulos em todas as alternativas e viabilizar o uso consciente de limiares de veto.

Do ponto de vista das contribuições, este trabalho colabora com a ideia de que a análise comparativa entre dois métodos multicritério aplicados à mesma base de dados é uma estratégia metodologicamente válida e enriquecedora, pois permite identificar convergências que reforçam a confiabilidade dos resultados e explorar divergências como ferramentas para uma análise mais aprofundada antes da tomada de decisão.

Esse trabalho também contribuiu para o desenvolvimento de pesquisas sobre melhorias em usinas de biomassa, especialmente na classificação de alternativas por meio de estruturação e modelagem com métodos multicritérios, gerando um ranqueamento que pode subsidiar decisões relacionadas à automação, ao controle e à otimização de processos, com maior racionalidade e justificativa técnica. Dessa forma, o trabalho contribui tanto para a replicação acadêmica da metodologia em outros contextos quanto para sua aplicação prática na indústria, como suporte a estratégias de melhoria contínua em usinas de biomassa.

Para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar a análise comparativa a outros métodos de apoio à decisão, como PROMETHEE, TOPSIS e VIKOR, de modo a verificar a consistência dos resultados obtidos. Sugere-se também a aplicação do framework proposto em outros contextos industriais que envolvam biomassa, como fábricas de papel e celulose e usinas de cana-de-açúcar, possibilitando avaliar a generalização da metodologia em arranjos produtivos distintos. Por fim, recomenda-se testar a robustez do ranqueamento obtido por meio da aplicação de outras técnicas ampliando assim a contribuição do estudo para a área de gestão industrial de sistemas de bioenergia.

REFERÊNCIAS

- ABEDIN, M. Z.; RONI, M. A. R.; ISLAM, S.; MIAH, M. A. H.; AHSAN, Z. Thermodynamic Analysis and Performance Improvement in Biomass Power Plant: A Comprehensive Review. *American Journal of Mechanical and Materials Engineering*, v. 8, n. 1, p. 1–14, 2024.
- ALAMOUDI, A. H.; GARFAN, S.; AL-ZUHAIRI, O.; ZAIDAN, B. B.; ZAIDAN, A. A.; ALBAHRI, O. S.; AHMARO, I. Y. Y.; ALBAHRI, A. S.; YUSSOF, S.; MAGABLEH, A. A. Exploring the integration of multi criteria decision analysis in the clean energy biodiesels applications: A systematic review and gap analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 133, p. 108023, 2024. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.108023.
- ALMEIDA, A. T. Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério. São Paulo: Atlas, 2013.
- ALVES, Wylker. Termelétricas: um panorama evolutivo. *Energia Inteligente*, On-line, 08 jan. 2025. Site: Energia Inteligente PET UFJF Disponível em: <https://energiainteligenteufjf.com.br/como-funciona/como-funcionam-as-termeletricas-um-panorama-evolutivo/>.
- ALVES, Andreia Cardoso; CAMPOS, Vanessa Ribeiro. Método multicritério ELECTRE III para ordenação de métodos de compressão de projeto. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENTAC), 20., 2024, Maceió. Anais... Maceió: ANTAC, 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Homologatória n. 3.309, de 25 de janeiro de 2024: revisão tarifária periódica da Roraima Energia S.A. Brasília, DF: ANEEL, 2024. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20243309ti.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- AVRAMOVA, Tanya; PENEVA, Teodora; IVANOV, Aleksandar. Overview of Existing Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Methods Used in Industrial Environments. *Technologies*, v. 13, n. 10, p. 444, 2025. DOI: 10.3390/technologies13100444.
- BALOPI, B.; MOYO, M.; GORIMBO, J.; LIU, X. Biomass-to-electricity conversion technologies: a review. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, v. 7, n. 2, p. 1-29, jun. 2025. DOI: 10.1007/s42768-025-00226-5.
- BRANS, J.-P.; MARESCHAL, B. PROMETHEE methods. In: PROMETHEE-GAIA methodology for MCDA. [S.l.]: Vrije Universiteit Brussel / Université Libre de Bruxelles, [2005]. Disponível em: <https://www.cin.ufpe.br/~if703/aulas/promethee.pdf>
- CHAVES, Maria Cecília de Carvalho; GOMES, Carlos Francisco Simões. Avaliação de biocombustíveis utilizando o apoio multicritério à decisão. *Production*, v. 24, n. 3, p. 495-507, jul./set. 2014. DOI: 10.1590/S0103-65132013005000035.
- COLLA, Luciane Maria; MARGARITES, Ana Cláudia Freitas; DECESARO, Andressa; MAGRO, Francisco Gerhardt; KRELING, Naiara; REMPEL, Alan;

MACHADO, Thaís Strieder. (2020) Waste biomass and blended bioresources in biogas production. In: DAHIYA, Anju (ed.). Biofuels for a more sustainable future: life cycle sustainability assessment and multi-criteria decision making. Amsterdam: Elsevier, 2020. cap. 1, p. 25–49.

DA SILVA, R. F.; BELLINELLO, M. M.; DE SOUZA, G. F. M.; AN TOMARIONI, S.; BEVILACQUA, M.; CIARAPICA, F. E. Deciding a Multicriteria Decision-Making (MCDM) Method to Prioritize Maintenance Work Orders of Hydroelectric Power Plants. *Energies*, v. 14, n. 24, p. 8281, 2021. DOI: 10.3390/en14248281.

DEMIR, G. Selection of Biomass Resources with Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Methods: Alternatives for Sustainable Energy Production. *Journal of Operations Intelligence*, v. 3, n. 1, p. 156-174, 2025. DOI: 10.31181/jopi31202537.

DUTTA, K.; DAVEREY, A.; LIN, J.-G. Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation. *Renewable Energy*, v. 69, p. 114-122, 2014. doi:10.1016/j.renene.2014.02.044. ideas.repec.org+2scholar.nycu.edu.tw+2

Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025); Smil (2017) – with major processing by Our World in Data. “Direct primary energy from biofuels” [dataset]. Energy Institute, “Statistical Review of World Energy”; Smil, “Energy Transitions: Global and National Perspectives” [original data].

Ember; Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025) – with major processing by Our World in Data. “Electricity generation from coal” [dataset]. Ember, “Yearly Electricity Data Europe”; Ember, “Yearly Electricity Data”; Energy Institute, “Statistical Review of World Energy” (2025).

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2025. (ano-base-2024) Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf

FIGUEIRA, José; MOUSSEAU, Vincent; ROY, Bernard. ELECTRE Methods. Chapter 4. Paris: LAMSADE – Université Paris-Dauphine, 2005. Disponível em: <https://www.lamsade.dauphine.fr/mcda/biblio/PDF/JFVMBR2005.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2025.

FERREIRA, Sabrina de Oliveira Pinto Muniz; FERREIRA Júnior, Jorge Alberto Muniz; BRAZ, Rafael Leite. Caracterização energética de biomassas agrícolas e florestais no estado de Pernambuco. *Ciência Florestal*, v. 34, n. 3, e73324, p. 1-23, 2024. DOI: 10.5902/1980509873324

GOLDEMBERG, José. Biomassa e energia. *Química Nova*, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 582–587, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/L6Pd3ZKdPqc4pZ4TQn5RyQy/?format=html&lang=pt>.

GUO, M.; SONG, W.; BUHAIN, J.; Bioenergy and biofuels: history, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 42, p. 712–725, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008302>.

International Energy Agency (IEA). (2024). Bioenergy. Paris: IEA. Recuperado em 2025, de <https://www.iea.org/energy-system/renewables/bioenergy>

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro. Guia para Aplicação da Análise Multicritério em Análise de Impacto Regulatório (AIR) no Inmetro. Brasília: Inmetro, 2022. Disponível em: <http://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/regulamentacao/analise-de-impacto-regulatorio/saiba-mais/guia-para-aplicacao-da-analise-multicriterio-em-air-no-inmetro.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2025.

JAHANSHAH, Akram; LOPES, Myriam; BRANDÃO, Miguel; DE CASTRO, Eduardo Anselmo. Development of bioenergy technologies: A scientometric analysis. *Heliyon*, v. 9, n. 9, p. e20000, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20000.

JOKAR, Faeze; VARNAMKHAHI, M. Jalali; HADI-VENCHEH, A. A New ELECTRE Method Based on Left and Right Score for Multicriteria Decision-Making. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2023. DOI: 10.1155/2023/6414686. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10656203/>

LIN, Lu; CHEN, Yongqin David. Evaluation of future water use for electricity generation under different energy development scenarios in China. *Sustainability*, Basel, v. 10, n. 1, Art. 30, 2018.

LIU, Yue; LIN, Ruojue; REN, Jingzheng. Fuzzy multicriteria decision making on ranking the biofuels production pathways. In: LORA, Electo Eduardo Silva; VENTURINI, Osvaldo José (Eds.). *Biofuels for a More Sustainable Future: Life Cycle Sustainability Assessment and Multi-Criteria Decision Making*. Amsterdam: Elsevier, 2020. cap. 11, p. 317–335. DOI:10.1016/B978-0-12-815581-3.00011-7.

MAJDI, Iman. Comparative evaluation of PROMETHEE and ELECTRE with application to sustainability assessment. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Qualidade de Sistemas) — Departamento de Engenharia de Sistemas de Informação, Concordia University, Montreal, Quebec, Canadá. Disponível em: https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/978069/1/Majdi_MSc_S2014

MALEFAKI, S.; MARKATOS, D.; FILIPPATOS, A.; PANTELAKIS, S. A comparative analysis of multi-criteria decision-making (MCDM) methods and normalization techniques in holistic sustainability assessment for engineering applications. *Aerospace*, v. 12, n. 2, p. 100, 2025. DOI: 10.3390/aerospace12020100. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2226-4310/12/2/100?>

MARESCHAL, B. Weight stability intervals in multicriteria decision aid. *European Journal of Operational Research*, v. 33, n. 1, p. 54–64, 1988. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0377221788902548>
Ministério de Minas e Energia. Programa Nacional do Alcool completa 49 anos com impactos positivos na economia e no meio ambiente. MME Notícias, 14 nov. 2024.

Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/programa-nacional-do-alcool-completa-49-anos-com-impactos-positivos-na-economia-e-no-meio-ambiente>

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.; BOETTNER, Daisie D.; BAILEY, Margaret B. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2014.

MORONE, P.; STRZAŁKOWSKI, A.; TANI, A. Biofuel transitions: An overview of regulations and standards for a more sustainable framework. In: Biofuels for a More Sustainable Future, Ren, J.; Scipioni, A.; Manzardo, A.; Liang, H. (eds.). Amsterdam: Elsevier, 2020. Cap 2 DOI: 10.1016/B978-0-12-815581-3.00002-6

MUKHAMETZANOV, I.; PAMUCAR, D. Sensitivity analysis in MCDM problems: a statistical approach. Decision Making: Applications in Management and Engineering, 2018 Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327235448>

NEIVA, P. S.; FURTADO, D. B.; FINZER, J. R. D. Capacidade térmica e poder calorífico de biomassa eucalipto. Uberaba, MG: Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Química, 31 Nov.–1 Dez. 2018. 8 p. Disponível em: <https://repositorio.uniube.br/bitstream/123456789/922/1/CAPACIDADE%20T%C3%89RMICA%20E%20PODER%20CALORIFICO%20DE%20BIOMASSA%20EUCALIPTO.pdf>.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Sistemas Isolados. Brasília: ONS, 2025. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-oi/sistemas-isolados>

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília: ONU Brasil, 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.

ORTI, M. V.; TEIVE, R. C. G. Sistema de decisão multicritério e multiobjetivo para programação de produção e dimensionamento de lote em uma indústria de beneficiamento de malha. In: XIII Computer on the Beach, Itajaí, SC, Brasil, 5–7 Maio 2022. Anais... Itajaí: Universidade do Vale do Itajaí, jul. 2022. v. 13, p. 243-250. DOI: 10.14210/cotb.v13.p243-250.

PEDIŠIUS, N.; PRASPALIAUSKAS, M.; PEDIŠIUS, J.; DZENAJAVIČIENĖ, E. F. Analysis of Wood Chip Characteristics for Energy Production in Lithuania. Energies, v. 14, n. 13, p. 3931, 2021. DOI: 10.3390/en14133931. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/13/3931>.

PEREIRA, M. F.; NICOLAU, V. P.; BAZZO, E. Exergoenvironmental analysis concerning the wood chips and wood pellets production chains. Biomass and Bioenergy, 2018 v. 119, p. 253-262, 2018. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.02.045

PEREIRA, Nayana Alves. Acordo de Paris: um marco global pela sustentabilidade climática. CCARBON/USP, 26 jun. 2025. Disponível em: <https://ccarbon.usp.br/pt/acordo-de-paris-um-marco-global-pela-sustentabilidade-climatica/>

PÉREZ-ALMADA, D.; GALÁN-MARTÍN, Á.; CONTRERAS, M. del M.; CASTRO, E. Integrated techno-economic and environmental assessment of biorefineries: review and future research directions. Sustainable Energy & Fuels, v. 7, 4031-4050, 2023. DOI: 10.1039/D3SE00405H.

RAMAN, R.; SREENIVASAN, A.; KULKARNI, N. V.; SURESH, M.; NEDUNGADI, P. Analyzing the Contributions of Biofuels, Biomass, and Bioenergy to Sustainable Development Goals. *iScience*, v. 28, n. 4, p. 112157, 2025. DOI: 10.1016/j.isci.2025.112157.

RIBEIRO, Alexandre Moretto; SILVA DA SILVA, Circe Mary. Medidas fuzzy. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, Londrina, v. 16, n. 4, p. 505–512, dez. 1995. DOI: 10.5433/1679-0375.1995v16n4p505.

Rigo, P. D.; Rediske, G.; Rosa, C. B.; Gastaldo, N. G.; Michels, L.; Neuenfeldt Júnior, A. L.; Mairesse Siluk, J. C. “Renewable Energy Problems: Exploring the Methods to Support the Decision-Making Process”. *Sustainability*, vol. 12, 2020, art. no. 10195.

RIPI, Letícia Isabela Romoda. Uso de técnicas para tomada de decisão na seleção de combustíveis alternativos em caldeiras a biomassa. 2025. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) — Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, 2025.

RITCHIE, Hannah. Electricity production by source. *Our World in Data*, 2025. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked>

RITCHIE, Hannah. Electricity production by source. *Our World in Data*, 2025. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-production-by-source?time=earliest..2024&focus=~Bioenergy>

ROY, B. Multicriteria methodology for decision aiding. London: Kluwer Academic Publishers, 1996. [http:// dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-2500-1](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-2500-1)

ROY, B. ELECTRE III: un algorithme de methode de classements fonde sur une representation floue des préférences en presence de critères multiples. *Cahieres de CERO*, v. 20, n. 1, p. 3-24, 1978.

STANULA, Z.; WIERUSZEWSKI, M.; ZYDRÓN, A.; ADAMOWICZ, K. Optimizing forest-biomass-distribution logistics from a multi-level perspective — Review. *Energies*, v. 16, n. 24, p. 7997, 2023. DOI: 10.3390/en16247997.

TAHERDOOST, Hamed; MADANCHIAN, Mitra. 1 A comprehensive overview of the ELECTRE method in multi-criteria decision-making. *Journal of Management Science & Engineering Research*, v. 6, n. 2, p. 5-16, 2023a. DOI: 10.30564/jmser.v6i2.5637.

TAHERDOOST, Hamed; MADANCHIAN, Mitra. 2 Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. *Encyclopedia*, v. 3, n. 1, p. 77-87, 2023b. DOI: 10.3390/encyclopedia3010006. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-8392/3/1/6>.

TURSI, A. A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion. *Biofuel Research Journal*, v. 6, n. 2, p. 962-979, 2020. DOI: 10.18331/BRJ2020.7.2.4. Disponível em: https://www.biofueljournal.com/article_88067_9dea751f85cffedc34672f9d07f6630a.pdf

UCELLA-FILHO, João Gilberto Meza; CEZARIO, Luis Filipe Cabral; SANTOS, Vaniele Bento dos; CARVALHO, Fernanda Aparecida Nazário de; DELATORRE, Fabíola Martins; CUPERTINO, Gabriela Fontes Mayrinck. Cavacos de madeira: características, aplicações e avanços de pesquisa no Brasil. In: Open Science Research VII. v. 7. São Paulo: Editora Científica Digital, 2022. ISBN 978-65-5360-239-7

WILLIAMS, Carol L.; DAHIYA, Anju; PORTER, Pam. Introduction to bioenergy. In: DAHIYA, Anju (Ed.). Bioenergy. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2015. p. 5–36. ISBN 978-0-12-407909-0. DOI: 10.1016/B978-0-12-407909-0.00001-8.

YANG, Guanglei; ZHA, Donglan; CAO, Dongqin; ZHANG, Guoxing. Time for a change: Rethinking the global renewable energy transition from the Sustainable Development Goals and the Paris Climate Agreement. Energy Research & Social Science, 2024. DOI: 10.1016/S2666-6758(24)00020-1.

ZAMRI, N. A.; KAMARUDDIN, A. H.; ABDULAZIZ, O.; ZAHARIN, H. A. An overview of palm oil biomass for power generation sector decarbonization in Malaysia: Progress, challenges, and prospects. WIREs Energy and Environment, v. 11, n. 6, e443, 2022.

ZIOLKOWSKA, Jadwiga R. Biofuels technologies: an overview of feedstocks, processes, and technologies. In: DAHIYA, Anju (ed.). Biofuels for a more sustainable future: life cycle sustainability assessment and multi-criteria decision making. Amsterdam: Elsevier, 2020. cap. 1, p. 1–24.

ZOMA, F.; SAWADOGO, M. A multicriteria approach for biomass availability assessment and selection for energy production in Burkina Faso: a hybrid AHP-TOPSIS approach. Heliyon, v. 9, n. 10, p. e20999, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20999.

ZYOUN, S. H.; FUCHS-HANUSCH, D. A bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques. Expert Systems with Applications, v. 78, p. 158–181, 2017. DOI: 10.1016/j.eswa.2017.02.0