UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LETÍCIA ISABELA ROMODA RIPI

USO DE TÉCNICAS PARA TOMADA DE DECISÃO NA SELEÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS EM CALDEIRAS A BIOMASSA

Palotina

2025

LETÍCIA ISABELA ROMODA RIPI

USO DE TÉCNICAS PARA TOMADA DE DECISÃO NA SELEÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS EM CALDEIRAS A BIOMASSA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, no Setor Palotina, na Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Bioenergia.
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin

Palotina
2025

Universidade Federal do Paraná. Sistemas de Bibliotecas.
Biblioteca UFPR Palotina.

R558 Ripi, Leticia Isabela Romoda
Uso de técnicas para tomada de decisão na seleção de combustíveis alternativos em caldeiras a biomassa / Leticia Isabela Romoda Ripi. – Palotina, PR, 2025.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, PR, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia.
Orientador: Prof. Dr.Eduardo Lucas Konrad Burin.

1. Biomassa. 2. Combustíveis alternativos. 3. Multicritério. I. Burin, Eduardo Lucas Konrad. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDU 620.9

Bibliotecária: Aparecida Pereira dos Santos – CRB 9/1653

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação BIOENERGIA - UEL - UEM - UEPG - UNICENTRO - UNIOESTE - UFPR da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **LETICIA ISABELA ROMODA RIPI** intitulada: **USO DE TÉCNICAS PARA TOMADA DE DECISÃO NA SELEÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS EM CALDEIRAS A BIOMASSA**, sob orientação do Prof. Dr. EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 13 de Dezembro de 2024.

Assinatura Eletrônica
16/12/2024 07:33:46.0
EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
13/12/2024 16:50:56.0
ADRIANA FERLA DE OLIVEIRA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
16/12/2024 11:11:13.0
WILLIAN ZALEWSKI
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO AMERICANA)

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 417961
Para autenticar este documento/assinatura, acesse https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp e insira o codigo 417961

Dedico este trabalho a minha família. Vocês são meu alicerce, muito obrigada.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Isaac e Lúcia, pelo apoio incondicional recebido durante toda minha trajetória, tudo que sou devo a vocês. Ao meu irmão Isaac, cunhada Amanda e sobrinha Sofia, por todo o amor e compreensão.

Ao meu esposo, Wilian, pela companhia nas noites escrevendo e pela cumplicidade para alcançar nossos objetivos juntos.

Ao meu orientador, Profº Dr. Eduardo Burin, por todo o seu conhecimento transferido a mim, pela sua atenção e orientação. O senhor foi fundamental para conclusão deste trabalho.

Aos técnicos e especialistas entrevistados, pela disponibilidade de tempo para contribuir com minha pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e a Universidade Federal do Paraná, por proporcionar a minha formação e possibilitar meu desenvolvimento profissional e pessoal em um ambiente saudável e acolhedor, disponibilizando todos os recursos necessários.

Aos membros da banca, minha sincera gratidão pela transferência de conhecimento e dedicação do tempo para avaliar o meu trabalho.

A todos o meu sincero agradecimento.

“O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou no caminho”.

Abraham Lincoln

RESUMO

O vapor de processo é utilizado como forma de energia térmica para a agroindústria. Gerado através de caldeiras convencionalmente abastecidas com cavaco de eucalipto, se torna um dos insumos mais críticos para esse segmento industrial. Estudos apontam que em um cenário futuro, considerando aumento das produções de grãos e proteína animal na região oeste do Paraná, ocorrerá déficit de madeira para fins energéticos. Para a geração de vapor de processo, fontes alternativas de energia são requeridas para superar a crise energética prevista, onde biocombustíveis podem ser a solução para esse desafio. Porém, a dificuldade de tomada de decisão de qual combustível alternativo utilizar em complementação ao cavaco de eucalipto, resulta de um processo com múltiplos critérios técnicos e mercadológicos. A escolha empírica de um combustível alternativo, por vezes intuitiva, pode levar a cheque a continuidade dos processos industriais, podendo também interferir em padrões de emissões atmosféricas, na confiabilidade operacional e vida útil das caldeiras industriais. Nesse sentido, o presente trabalho visa à utilização de métodos de apoio à tomada de decisão multicritério aliados à caracterização de diferentes biocombustíveis alternativos ao cavaco de eucalipto, obtidos através da literatura. Foram definidos os critérios: poder calorífico superior, teor de cinzas, temperatura de condensação de H_2SO_4, índice de tendência à formação de incrustação, índice de tendência à formação de escória, teor de cloro, teor de umidade e preço do combustível. Foram selecionadas as biomassas alternativas: sorgo biomassa, resíduo de farelo de soja, bagaço de cana-de-açúcar, casca de soja, bambu e lodo flotado do tratamento primário de efluente de frigoríficos de aves, utilizando como padrão de referência a caracterização do cavaco de eucalipto. Foram empregadas três ferramentas multicritérios na avaliação: AHP, TOPSIS e MOORA, sendo os dois últimos utilizados para ranqueamento das alternativas. Foi utilizado o software Matlab para programação dos métodos. Além disso, foi realizado um questionário com especialistas e técnicos de processo para comparar o ranqueamento dos métodos computacionais e a decisão realizada por um indivíduo. Foram obtidos resultados iguais para a primeira e a última posição do ranqueamento, ficando em primeiro colocado o cavaco de eucalipto, resultado esperado por se tratar do combustível convencional utilizado nas caldeiras industriais, e em última posição o resíduo de farelo de soja, por se tratar de um material nobre e devendo ser utilizado para fins energéticos somente em caso de destinação final. Os métodos de decisão multicritério tiveram desempenhos similares entre si, sendo recomendados pela facilidade na avaliação de uma matriz de decisão e pela precisão na escolha, não sendo atribuído fatores sociais e culturais na definição de uma nova alternativa energética para as agroindústrias.

Palavras-chave: combustíveis alternativos; biomassa; multicritério; tomada de decisão.

ABSTRACT

Process steam is used as a source of heat for the agroindustry. It is generated through boilers conventionally fueled with eucalyptus wood chips, making it one of the most critical inputs for this industrial segment. Studies indicate that in the future, considering the increase in grain and animal protein production in the western region of Paraná, there will be a wood deficit for energy purposes. For process steam generation, alternative energy sources are required to overcome the predicted energy crisis, where biofuels could be the solution to this challenge. However, the difficulty in deciding which alternative fuel to use in addition to eucalyptus wood chips arises from a process with multiple technical and market criteria. The empirical choice of an alternative fuel, often intuitive, may compromise the continuity of the industrial process, and may also interfere with atmospheric emission standards, operational reliability, and the lifespan of industrial boilers. In this context, the present study aims to apply multicriteria decision-making methods in conjunction with the characterization of different biofuels alternative to eucalyptus wood chips, obtained from the literature. The following criteria were defined: higher heating value, ash content, sulfuric acid condensation temperature, tendency to form deposits, tendency to form slag, chlorine content, moisture content, and fuel price. The alternative biomass sources selected were: sorghum biomass, soybean meal residue, sugarcane bagasse, soybean husk, bamboo, and floated sludge from primary treatment of poultry slaughterhouse effluent, using eucalyptus wood chips characterization as the reference standard. Three multicriteria decision-making tools were employed in the evaluation: AHP, TOPSIS, and MOORA, with the latter two used for ranking the alternatives. Matlab software was used to program the methods. Additionally, a survey was conducted with experts and process technicians to compare the rankings of the computational methods with decisions made by an individual. Similar results were obtained for the first and last positions in the ranking, with eucalyptus wood chips in first place, which was expected since it is the conventional fuel used in industrial boilers, and soybean meal residue in last place, as it is a high-value material that should only be used for energy purposes in cases of final disposal. The multicriteria decision-making methods performed similarly to each other, and were recommended for their ease of evaluating a decision matrix and the accuracy of the choice, with no social or cultural factors being considered in the definition of a new energy alternative for the agroindustries.

Key words: alternative fuels; biomass; multicriteria; decision making.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DIAGRAMA BÁSICO DE CALDEIRAS 11
FIGURA 2 - PERDAS DE ENERGIA NO GERADOR DE VAPOR 11
FIGURA 3 - OFERTA INTERNA DE ENERGIA POR FONTE NO BRASIL EM 2022 12
FIGURA 4 - TRÊS NÍVEIS HIERÁRQUICOS 30
FIGURA 5 - ESQUEMATIZAÇÃO DO PROCEDIMENTO METODOLÓGICO 36
FIGURA 6 - ESTRUTURA HIERÁRQUICA DO PROCESSO DECISIVO DA PESQUISA 39
FIGURA 7 - PESO ESTABELECIDO POR CRITÉRIO ATRAVÉS DA AVALIAÇÃO DE ESPECIALISTAS 49
FIGURA 8 - RANQUEAMENTO ENTRE COMBUSTÍVEIS PARA DIFERENTES MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO 51
FIGURA 9 - GRÁFICO DE RADAR DO RANQUEAMENTO DAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE BIOMASSA SELECIONADAS 52
FIGURA 10 - RANQUEAMENTO OBTIDO ENTRE AS DIFERENTES METODOLOGIAS PARA CADA ALTERNATIVA ESTUDADA 54

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS.....14
QUADRO 2 - TÉCNICAS DE APOIO A TOMADA DE DECISÃO 28

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - EMPREENDIMENTOS AGROINDUSTRIAIS NO OESTE PARANAENSE....8
TABELA 1 - EMPREENDIMENTOS AGROINDUSTRIAIS NO OESTE PARANAENSE....9
TABELA 2 - PRINCIPAIS ATIVIDADES AGROINDUSTRIAIS NO OESTE PARANAENSE....9
TABELA 3 - CARACTERIZAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DE DIFERENTES BIOMASSAS....16
TABELA 3 - CARACTERIZAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DE DIFERENTES BIOMASSAS....17
TABELA 4 - CARACTERIZAÇÃO IMEDIATA DE DIFERENTES BIOMASSAS....17
TABELA 4 - CARACTERIZAÇÃO IMEDIATA DE DIFERENTES BIOMASSAS....18
TABELA 5 - COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DE DIFERENTES BIOMASSAS....18
TABELA 6 - LIMITES PERMISSÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE METAIS PESADOS EM RESÍDUOS....19
TABELA 7 - PADRÕES ESTABELECIDOS DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS PARA GERADORES DE CALOR OU ENERGIA QUE UTILIZEM DERIVADOS DE MADEIRA COMO COMBUSTÍVEL....20
TABELA 8 - COMPOSIÇÃO IMEDIATA DE DIFERENTES BIOMASSAS....22
TABELA 9 - TEOR DE CINZAS PRESENTE EM DIFERENTES BIOMASSAS....25
TABELA 10 - ESCALA FUNDAMENTAL DO MÉTODO AHP....30
TABELA 11 - MATRIZ DE DECISÃO A (i,j): COMPARAÇÃO ENTRE CRITÉRIOS E ALTERNATIVAS....38
TABELA 12 - CRITÉRIOS CONSIDERADOS NO ESTUDO....41
TABELA 13 - ÍNDICE RANDÔMICO DE SAATY....42
TABELA 14 - VETOR PRIORIDADE OBTIDO ATRAVÉS DA AVALIAÇÃO DOS ESPECIALISTAS....48
TABELA 15 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO TOPSIS E MOORA....50
TABELA 16 - RANQUEAMENTO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA CALDEIRAS INDUSTRIAIS OBTIDOS ATRAVÉS DO JULGAMENTO DE TÉCNICOS E ESPECIALISTAS....53

TABELA 17 - COEFICIENTE DE KENDALL TAU E p VALOR DAS COMBINAÇÕES ENTRE MCDM E ESPECIALISTAS.....56

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	*Analytic Hierarchy Process*
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
CI	Índice de Consistência
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EES	*Engineering Equation Solver*
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
HEFA	Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados
MDCM	Métodos de Decisão Multicritério
MOORA	*Multi Objetive Optimization on the basis of Ratio Analysis*
NR	Norma Regulamentadora
PCS	Poder Calorífico Superior
PCI	Poder Calorífico Inferior
SEMA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
TOPSIS	*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*
% C	Teor de Carbono
% H	Teor de Hidrogênio
% O	Teor de Oxigênio
% N	Teor de Nitrogênio
% S	Teor de Enxofre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 3
2 OBJETIVOS 5
2.1 OBJETIVOS GERAIS 5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 5
3 JUSTIFICATIVA 6
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 8
4.1 AGROINDÚSTRIA NO OESTE PARANAENSE 8
4.2 UNIDADES GERADORAS DE VAPOR 10
4.3 BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS 12
4.4 BIOMASSAS PARA QUEIMA EM CALDEIRAS 13
4.5 QUEIMA DE RESÍDUOS EM UNIDADES GERADORAS DE VAPOR 19
4.6 CARACTERIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS PARA FINS ENERGÉTICOS 21
4.6.1 Teor de Umidade 21
4.6.2 Composição Imediata 21
4.6.3 Análise Elementar 22
4.6.4 Poder Calorífico 23
4.6.5 Teor de Cloro 23
4.6.6 Teor de Metais Pesados 24
4.6.7 Composição da fração inerte do combustível 25
4.7 PROCESSOS DE INCRUSTAÇÃO E CORROSÃO EM CALDEIRAS 25
4.8 MÉTODOS MULTICRITÉRIO PARA TOMADA DE DECISÃO 27
4.8.1 Método AHP 29
4.8.2 Método TOPSIS 31
4.8.3 Método MOORA 33
5 MATERIAIS E MÉTODOS 35
5.1 CONSTRUÇÃO DA MATRIZ DE DECISÃO 36
5.1.1 Escolha dos critérios avaliados 36
5.1.2 Escolha das alternativas selecionadas 37

5.2 MÉTODO AHP 39
5.2.1 Detalhamento do método AHP 39
5.2.2 Desenvolvimento do método AHP no Matlab 42
5.2.3 Questionário on-line para obtenção da matriz de comparação par a par 42
5.3 RANQUEAMENTO DAS ALTERNATIVAS DE BIOMASSA 42
5.3.1 Detalhamento do método TOPSIS 42
5.3.2 Desenvolvimento do método TOPSIS no Matlab 44
5.3.3 Detalhamento do método MOORA 44
5.3.4 Desenvolvimento do método MOORA no Matlab 45
5.4 VALIDAÇÃO DO RANQUEAMENTO 46
5.5 ESPECIALISTAS E TÉCNICOS 46
5.6 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE KENDALL TAU 46
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO 48
6.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP 48
6.2 RANQUEAMENTO DAS ALTERNATIVAS DE BIOMASSA 50
6.3 VALIDAÇÃO DOS RANQUEAMENTOS 53
6.4 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE KENDALL TAU 56
7 CONCLUSÃO 57
8 TRABALHOS FUTUROS 59
REFERÊNCIAS 60
APÊNDICE A 72
APÊNCIDE B 73
APÊNDICE C 79
APÊNDICE D 80
APÊNDICE E 81
APÊNDICE F 83
APÊNDICE G 87

1 INTRODUÇÃO

A região oeste do Paraná é responsável pela produção de 17,3% da soja, 28,3% do milho e 10% do trigo plantado no estado, também se destaca na produção de proteína animal: 63% dos rebanhos suínos, 30% da produção de aves e 83% da produção do pescado de tilápia do estado (IBGE, 2024). Toda a cadeia agroindustrial demanda energia para armazenagem e industrialização de suas riquezas. Para os grãos, a demanda é principalmente na secagem em armazéns e em plantas de processamento. Para produção de proteína animal, vapor de processo e energia elétrica são insumos indispensáveis.

O vapor de processo é utilizado como forma de calor para a agroindústria. Gerado através de caldeiras, convencionalmente abastecidas com cavaco de eucalipto, se torna um dos insumos mais críticos para esse segmento industrial. De acordo com a EPE (2024), o setor industrial foi responsável pelo consumo de 31,8% da oferta interna de energia no Brasil. O estudo de Corradi *et al*. (2021) aponta que em cenário futuro considerando aumento das produções de grãos e proteína animal na região oeste do Paraná, ocorrerá déficit de madeira para fins energéticos.

Devido as grandes proporções da cadeia, são gerados grandes volumes de resíduos nos processos agroindustriais. Conforme Carvalho *et al*. (2020), “a bioenergia é considerada uma das energias mais atrativas por oferecer alternativa sustentável para resíduos diversos, utilizando a biomassa como combustível sólido e apresentando baixas emissões de CO_2”. É considerado resíduo, conforme SEMA (2008), “material sólido ou líquido destinado à queima numa caldeira junto com seu combustível principal”.

Os resíduos devem ser gerenciados conforme legislação vigente, normalmente sendo direcionados a aterros sanitários ou compostagem. Conforme SEMA (2008), os resíduos podem ser queimados em caldeiras, recebendo agregação de valor quando associado à queima conjunta ao cavaco de eucalipto, se tornando um coproduto dos processos da agroindústria.

No entanto, esses resíduos podem possuir composição distinta do combustível principal do equipamento, podendo impactar a estabilidade do processo de combustão, bem como a vida útil dos geradores de vapor. Conforme Deboni (2017), é preciso um controle de qualidade especializado durante a compra de biomassas como combustível para caldeira, de modo que o material entregue a melhor conversão energética possível.

Existem inúmeros estudos apontando quais parâmetros devem ser avaliados para uma boa conversão energética. Conforme Marafon *et al*. (2016), a potencialidade de qualquer combustível é traduzida através das características termoquímicas: composição elementar, densidade, granulometria, teor de cinzas, grau de umidade e poder calorífico da biomassa.

Por englobar materiais heterogêneos e de constituição química bastante diversificada, a análise físico-química e a determinação da composição constituem papel importante na caracterização da biomassa para produção de energia (Vaz Junior; Soares, 2015 *apud* Marafon *et al*., 2016).

Porém, os parâmetros citados acima fornecem poucas informações sobre a tendência do combustível em formar depósitos e incrustações, bem como sobre a possível intensificação de problemas de corrosão em sistemas de combustão. Os elementos inorgânicos presentes em menor concentração, como: cloro, enxofre, sílica, sódio, magnésio, cálcio, potássio e fósforo, são os responsáveis pela formação de espécies corrosivas durante a combustão da biomassa e interferem na formação de depósitos e escórias, além de emissões nocivas ao meio ambiente (Nakai *et al*., 2016).

Consequentemente, a escolha entre alternativas de combustíveis para geradores de vapor é baseada na avaliação de múltiplos critérios e diferentes parâmetros, tornando a escolha do decisor complexa, muitas vezes atribuindo personalidade do decisor à escolha. Nesses casos, é recomendado o uso de métodos de apoio à tomada de decisão, buscando ordenar ou descrever alternativas em um processo decisório na presença de múltiplos critérios (Chaves; Gomes, 2014).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Definir técnicas de tomada de decisão multicritério para seleção de combustíveis alternativos como fonte de energia renovável para caldeiras em agroindústrias.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar levantamento bibliográfico de caracterização de biomassas alternativas;
- Selecionar os principais parâmetros a se avaliar na seleção de uma biomassa para fim energético;
- Desenvolver algoritmo para os métodos de decisão multicritério selecionados;
- Desenvolver formulário para entrevistar especialistas e técnicos convidados a participarem do estudo;
- Elaborar ranking entre as alternativas através de métodos de decisão multicritério;
- Validar os ranqueamentos obtidos pelos métodos de decisão multicritério através de comparação com dados obtidos por meio de entrevista com especialistas e técnicos convidados;

3 JUSTIFICATIVA

Conforme Corradi *et al*. (2021), a região oeste do Paraná enfrenta o dilema entre não ceder terras com vocação para o plantio de grãos para outra atividade. A necessidade por biomassa para energia e o déficit de madeira regional é suprido pela oferta de outras regiões, gerando incerteza em custos e no suprimento de biomassa para as indústrias da região oeste.

Os resíduos gerados pelos processos produtivos nas agroindústrias são passivos ambientais que necessitam de destinação adequada. A associação dessa destinação à demanda por novas fontes de energia renovável pode tornar os processos autossustentáveis, reduzindo a dependência dos combustíveis convencionais, sendo uma estratégia para desenvolvimento econômico do país (Vieira, 2012).

De acordo com Sindiavipar (2022), em 2021 foram abatidas cerca de 650 milhões de cabeças de ave no oeste do Paraná, representando 31% da produção total do estado. De acordo com Ceratto (2016), são utilizados 0,00108 m³ de biomassa florestal como combustível para caldeira por ave abatida no Brasil. A partir do balanço de aves abatidas no ano de 2021, é possível estimar um consumo de aproximadamente 700 mil m³ de eucalipto como combustível de caldeira de frigorífico de aves. É utilizado para secagem de uma tonelada de milho, soja e trigo respectivamente 0,078; 0,043 e 0,060 m³ de lenha (Bell, 2012). Desse modo, é indiscutível a dependência e expressiva demanda por biomassa na cadeia de produção dos cultivares.

Porém, definições não estratégicas, empíricas, no meio industrial podem causar prejuízos de grande escala. O estudo de Martínez (2016) utiliza cinco métodos multicritério para apoio à tomada de decisão na escolha de biomassa para alimentação de biorreatores do tipo Fischer Tropsch. O autor indica que a seleção adequada do combustível é fundamental para cumprir com os requisitos do biorreator, onde os métodos de tomada de decisão multicritério, considerando características e as diferentes alternativas de biomassa possuem a finalidade de selecionar a melhor opção dentre as alternativas.

Os autores Chai e Zhou (2022) em sua publicação discorrem sobre o uso de técnicas multicritério para seleção de combustíveis alternativos para a aviação, tema essencial para sucesso da gestão da cadeira de abastecimento de combustíveis. O estudo avaliou quatro diferentes combustíveis alternativos para aviação, utilizando os métodos multicritério para reduzir as incertezas inerentes à escolha complexa de combustíveis alternativos. O uso de MDCM (métodos de decisão multicritério), para o autor, reduz a incerteza inerente ao processo de decisão, como: preferências subjetivas, opiniões e pensamentos diferentes para cada decisor do processo.

Dessa forma, este trabalho visa contribuir com as agroindústrias do oeste paranaense que demandam biomassa para fins energéticos, tendo em vista a futura indisponibilidade do principal combustível utilizado – cavaco de eucalipto – buscando expor os principais parâmetros que devem ser avaliados durante a escolha de um combustível e diferentes métodos de decisão com base na avaliação de múltiplos critérios.

Espera-se que com este trabalho, quando as indústrias tiverem oportunidade de complementar sua cadeia energética, a escolha não seja imprecisa, aumentando a probabilidade de efetividade da biomassa escolhida por cada fábrica. Além disso, a padronização do processo de escolha de uma biomassa alternativa pode contribuir significativamente para fatores organizacionais. Uma vez que, ao estabelecer diretrizes claras, as equipes podem operar de maneira eficiente, sem variações por eventual ausência de especialistas nesse processo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 AGROINDÚSTRIA NO OESTE PARANAENSE

O movimento implementado pelo governo Getúlio Vargas em 1930, chamado “Marcha para o oeste”, conciliado com início das primeiras obras de estradas, iniciaram os movimentos de ocupação do território oeste paranaense. O próximo fluxo populacional chegando no oeste paranaense foi em meados de 1950 a 1970, oriundos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Entre as décadas de 1950 a 1970, a população oeste do Paraná saltou de 16 mil para 760 mil habitantes (IPARDES, 2008).

A partir da década de 1970, o avanço da tecnologia e programas de financiamento federais permitiram o desenvolvimento e modernização da agroindústria brasileira. Cooperativas participaram ativamente do processo de modernização e estruturação regional, modernizando e diversificando os produtos da agroindústria do oeste paranaense (Almeida, 2020). A Tabela 1 indica o mapeamento da quantidade de empreendimentos agroindustriais na mesorregião oeste do Paraná.

A Tabela 2 indica o desempenho das atividades agroindustriais do oeste paranaense comparado com o estado no ano de 2017. A atividade agrícola e a industrialização desse mercado têm grande impacto na economia da região, com impacto em renda e geração de empregos aos habitantes. Conforme a tabela, o oeste do Paraná possui participação superior a 30% da produção do estado nas seguintes atividades: rebanho de suínos, efetivo de galináceos, produção de tilápia e produção de milho.

TABELA 1 - EMPREENDIMENTOS AGROINDUSTRIAIS NO OESTE PARANAENSE

Município	Cooperativa	Frigorífico abate bovinos	Frigorífico abate aves	Frigorífico abate peixes	Frigorífico abate suínos	Indústria de Derivados de leite	Indústria de Pescados
							(continua)
Assis Chateaubriand	1	1					
Braganey							1
Cafelândia	1		1	1	1	1	1
Capitão Leônidas Marques		1					
Cascavel	3	1	3	2	1	5	1
Catanduvas						1	
Céu Azul		1					
Corbélia		1					
Formosa do Oeste						1	

TABELA 2 - EMPREENDIMENTOS AGROINDUSTRIAIS NO OESTE PARANAENSE

Município	Cooperativa	Frigorífico abate bovinos	Frigorífico abate aves	Frigorífico abate peixes	Frigorífico abate suínos	Indústria de Derivados de leite	Indústria de Pescados
							(conclusão)
Foz do Iguaçu			1	2		1	
Guaraniaçu		1				1	
Ibema		1					
Iguatu							
Itaipulândia					1		
Lindoeste		1				1	
Marechal Cândido Rondon	1	1	1	5	1	1	2
Matelândia			1		1	2	
Medianeira	2	1	1		2		
Mercedes							
Missal		1				2	
Nova Aurora	1	2	1				
Nova Santa Rosa		1					
Palotina	1	2	1	2		1	2
Quatro Pontes							
Santa Lúcia						1	
Santa Terezinha do Itaipu		1					
São Miguel do Iguaçu						1	
Serranópolis do Iguaçu						1	
Toledo	2	1			1	1	
Três Barras do Paraná						1	

FONTE: ADAPAR *apud* Almeida (2020).

TABELA 3 - PRINCIPAIS ATIVIDADES AGROINDUSTRIAIS NO OESTE PARANAENSE

Itens	Região Oeste	Paraná	% Região Oeste
Rebanho de suínos	4,5 milhões	7,1 milhões	63,50%
Ovos de galinha	64,2 mil dúzias	288 mil dúzias	22,30%
Efetivo de galináceos	106,9 milhões	335 milhões	31,90%
Produção de leite	616,5 milhões de litros	2,74 bilhões de litros	22,50%
Produção de tilápia	52 milhões de kg	71,2 milhões de kg	73,00%
Produção de milho	4,9 milhões de ton	13,8 milhões de ton	35,00%
Produção de soja	3,6 milhões de ton	17 milhões de ton	21,30%
Produção de trigo	429,6 mil ton	3,3 milhões de ton	12,80%
Exportação das cooperativas	U$ 216,6 milhões	U$ 2,3 bilhões	11,00%

FONTE: Observatório territorial *apud* Almeida (2020).

4.2 UNIDADES GERADORAS DE VAPOR

Vários processos industriais demandam vapor e água quente, e, por esses motivos, as caldeiras são equipamentos vitais para a cadeia industrial. Conforme a NR 13 (2018), caldeiras são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando da energia térmica para produção de vapor de processo.

Geradores de vapor são empregados para converter um fluido em estado líquido para o estado gasoso para ser utilizado em diversas aplicações: aquecimento, acionamento de máquinas motrizes, processos industriais, geração de energia elétrica, dentre outros (Baggio, 2018).

A preferência pelo vapor como fluido de trabalho é justificada pelo seu alto calor latente, aliado à disponibilidade de água em empreendimentos industriais. Unidades geradoras de vapor são normalmente equipadas com: fornalha, tambor de vapor, economizador, aquecedor de ar, filtro de gases e chaminé. Podem ser caracterizadas conforme o seu aspecto construtivo: flamotubular, aquatubular, mista ou ainda elétrica (Bazzo, 1995).

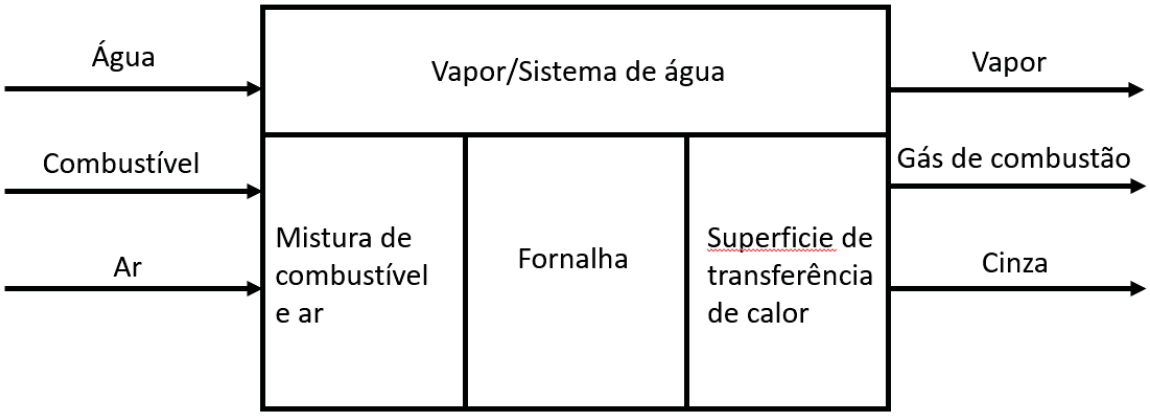
O processo de evaporação em equipamentos flamotubulares ocorre externamente aos tubos, e internamente nas aquatubulares. Caldeiras do tipo mista possuem a fornalha em concepção aquatubular e o tambor de vapor flamotubular. Caldeiras elétricas utilizam da energia dissipada por resistores como fonte de energia para evaporação da água (Baggio, 2018).

Caldeiras que empregam como combustível a biomassa utilizam do princípio da combustão para conversão da energia química da matéria em energia térmica. São compostas por dois sistemas complexos principais: água-vapor e gases de combustão. (Baggio, 2018).

A produção de vapor traz consigo um alto custo operacional. A busca por métodos e melhorias no rendimento térmico de caldeiras é indispensável, motivando pesquisas e desenvolvimento de novas técnicas, materiais e métodos para ampliar a eficiência das unidades geradoras de vapor (Lima, 2018). O cálculo de rendimento térmico de caldeiras pode ser verificado no Apêndice F, utilizando a metodologia recomendada pela *American Society of Mechanical Engineers,* a norma ASME PTC 4 (ASME, 2013).

A Figura 1 apresenta o diagrama básico de caldeiras demonstrando de maneira simples suas entradas e saídas do sistema. As entradas: água, combustível e ar. As saídas: vapor, gases de combustão e cinza.

FIGURA 1 - DIAGRAMA BÁSICO DE CALDEIRAS

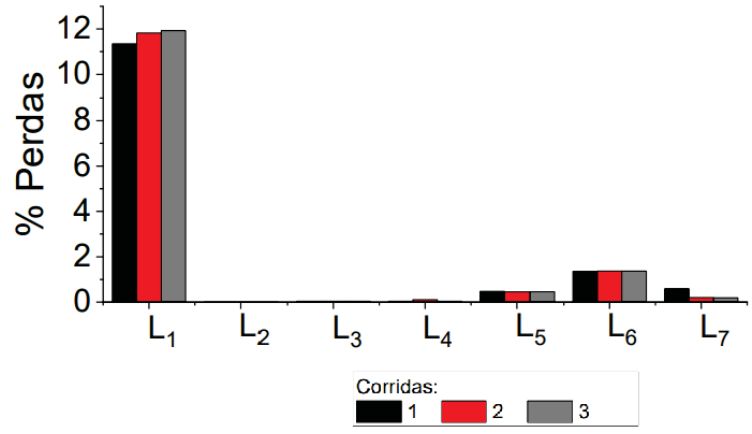


FONTE: Adaptado de Oyama (2017).

As principais perdas de energia em unidades geradoras de vapor (UGV) são associadas aos gases de combustão, variando entre 10 e 13% das perdas da energia total do combustível (Mantovan, 2022). Segundo a autora, em processos instáveis e mal regulados as perdas podem chegar até 30%.

A Figura 2 apresenta as perdas de energia no gerador de vapor, obtidas no trabalho de Mantovan (2022) através da análise energética através da metodologia para determinação de eficiência em geradores de vapor conforma ASME PTC 4 (ASME, 2013), onde a principal perda do sistema é associada aos gases de combustão, sucedida de, respectivamente, perdas ao meio ambiente por radiação e convecção, purgas e carbono não queimado no combustível presentes nas cinzas.

FIGURA 2 - PERDAS DE ENERGIA NO GERADOR DE VAPOR



FONTE: Mantovan (2022).

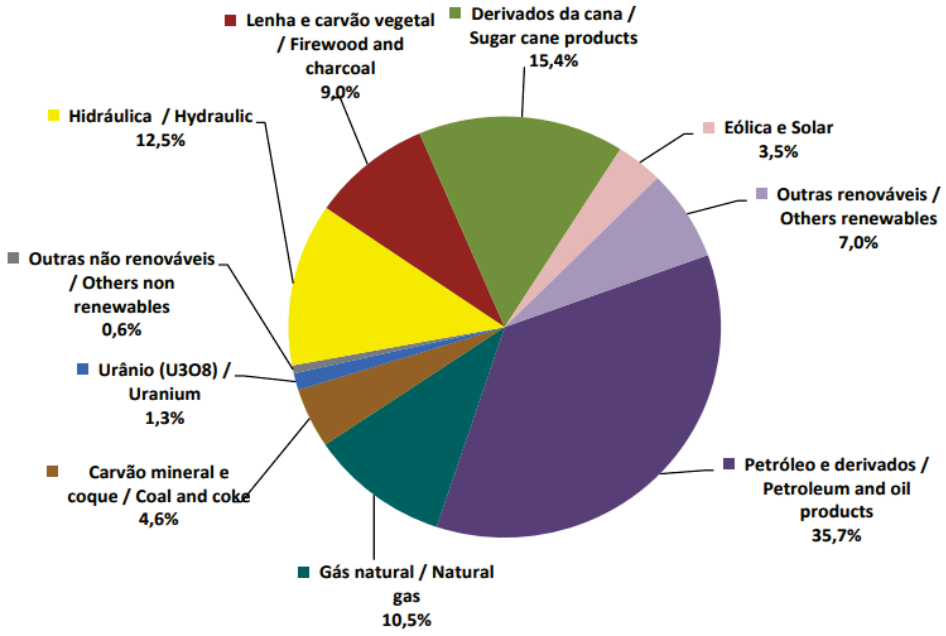
Em que L1 é a perda de energia associada aos gases; L2 é o calor relacionado às cinzas leves que saem da unidade; L3 o calor relacionado às cinzas pesadas que saem da fornalha; L4 a perda devido ao teor de monóxido de carbono no gás de combustão; L5 é a perda associada às purgas; L6 a perda de energia para o ambiente por radiação e convecção; L7 é a perda de energia devido à presença de carbono não queimado nas cinzas.

4.3 BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS

As fontes alternativas de energia se renovam em ciclos naturais e têm como fonte primária o Sol, fonte inesgotável de energia na escala do tempo e níveis de consumo energético da humanidade, e, por isso tem recebido grande atenção, diante da possibilidade da escassez das energias tradicionais não renováveis provenientes de minérios e dos impactos ambientais gerados por essas (Galdino *et al*., 2000).

A biomassa é uma importante fonte de energia para o Brasil. No balanço energético nacional elaborado pela EPE (2023) presente na Figura 3, os derivados da cana-de-açúcar representaram no ano de 2022 15,4% da oferta interna de energia e a lenha e o carvão vegetal 9%. A principal fonte de lenha e carvão vegetal no Brasil é o eucalipto, utilizado industrialmente em forma de toras ou cavaco.

FIGURA 3 - OFERTA INTERNA DE ENERGIA POR FONTE NO BRASIL EM 2022



FONTE: EPE (2023).

Conforme Omashi *et al*. (2004), biomassa é todo material orgânico, não fóssil, que possua em sua estrutura energia química. Incluem todos os tipos de vegetação aquáticas ou terrestres, lixo orgânico, resíduos de agricultura, resíduos florestais, resíduos produzidos por animais e outros resíduos industriais.

A principal diferença entre a biomassa e o petróleo é a presença de átomos de oxigênio e nitrogênio na composição química da biomassa. Esse é o principal fator que confere reduzidas emissões atmosféricas. A composição com oxigênio e nitrogênio da biomassa possui menor demanda de átomos de oxigênio do ar para realizar a combustão completa do combustível, no entanto, reduz substancialmente seu poder calorífico (Brasil *et al*., 2019).

Conforme Rowell *et al*. (2005), a biomassa lignocelulósica é composta principalmente por celulose, hemicelulose, lignina, extrativos, sais minerais, podendo apresentar amidos, proteínas e ácidos. Esses componentes dependem do vegetal de origem, espécie da planta, região de cultivo, clima, idade, período do ano em que foi plantada e colhida (Brasil *et al*., 2019).

Para aproveitamento com máximo rendimento da conversão energética da biomassa, a composição e a escolha da rota de conversão estão totalmente atreladas. Diante disso, conhecer a composição da biomassa indica o processo de conversão ideal para cada combustível. As principais são: composição elementar, análise imediata, poder calorífico, teor de umidade, presença de metais pesados e composição da fração inerte do combustível (Brasil *et al*., 2019).

4.4 BIOMASSAS PARA QUEIMA EM CALDEIRAS

As principais fontes de biomassa são as culturas energéticas plantadas para este fim e os resíduos. As culturas energéticas incluem culturas lenhosas e agrícolas, e, os resíduos incluem restos florestais, resíduos de culturas agrícolas, esgoto, resíduos sólidos urbanos, resíduos industriais e resíduos animais (Henne, 2018). No Quadro 1 é apresentada a classificação de biocombustíveis conforme Lora e Nogueira (2003).

QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

Primeiro nível	Segundo nível	Conceito
Biocombustíveis da madeira (Dendrocombustíveis)	Combustíveis direto da madeira	Madeira produzida para fins energéticos, usada direta ou indiretamente como combustível
	Combustíveis indiretos da madeira	Biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, subprodutos da exploração florestal e resultantes do processamento industrial da madeira para fins não-energéticos
	Combustíveis de madeira recuperada	Madeira usada diretamente ou indiretamente como combustível, derivada de atividades socioeconômicas que empregam produtos de origem florestal
Biocombustíveis não-florestais (Agrocombustíveis)	Combustíveis de plantações energéticas	Combustível sólido e líquido produzido a partir de plantações anuais, ex: álcool de cana-de-açúcar
	Subprodutos agrícolas	Resíduos de colheita e outros tipos de subprodutos de culturas, como palhas e folhas.
	Subprodutos animais	Esterco de aves, bovinos e suínos.
	Subprodutos agroindustriais	Subprodutos agroindustriais como o bagaço de cana, licor negro, lodo e a casca de arroz.
Resíduos urbanos		Resíduos sólidos e líquidos gerado em cidades e vilarejos.

FONTE: Adaptado de Lora e Nogueira (2003).

Apesar da maior fonte da biomassa para geração de calor no Brasil ser o bagaço de cana-de-açúcar, 9% da energia consumida é proveniente de lenha ou carvão, conforme a Figura 3, sendo principalmente madeiras do gênero *Eucalyptus* (IBÁ, 2020). Diante dos produtos oriundos da madeira, o cavaco de eucalipto é o mais utilizado, pois permite maior mecanização dos processos, menor custo de mão-de-obra e maior eficiência de queima (Miranda *et al*., 2017).

O Brasil, através do desenvolvimento de tecnologias de genética, plantio e manejo, se tornou detentor da mais moderna tecnologia florestal do planeta (Foelkel, 2005). Conforme Foelkel (2005), o gênero Eucalipto chegou ao Brasil na década de 1860 com a finalidade de quebra-vento, paisagismo e obtenção de óleo essencial, entretanto, na década de 1930 alcançou o uso efetivo como fim energético para locomotivas a vapor no estado de São Paulo, aumentando gradativamente seu uso para o fim energético com o passar dos anos.

As espécies de eucalipto têm sido preferencialmente utilizadas devido ao seu rápido crescimento, capacidade de adaptação às regiões do país, alta produtividade (média nacional de 41 $m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$, em ciclos de corte de aproximadamente sete anos), com

menores custos e maiores taxas de retorno do investimento (Santarosa; Penteado Jr.; Goulart, 2014).

Diante dos desafios considerando o crescimento da demanda por eucalipto, desde 2012, estudos utilizando o Sorgo Biomassa para complementação de combustíveis em caldeiras de usinas de grande porte vêm se intensificando tendo em vista o cenário de futura escassez de combustível para essas indústrias. Conforme May *et al*. (2015), o sorgo biomassa apresenta grande capacidade para fins energéticos, o cultivar SORGO BIOMASSA BRS 716 é o mais indicado para esse fim, e sua produtividade pode atingir em 180 dias 40 ton de matéria seca por hectare, superior ao eucalipto, que leva em torno de 7 anos para colheita, com produtividade de 40 $m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$ com teor de umidade de 60% em média.

Outra biomassa que vem ganhando atenção é o bambu, porém, ainda demanda de pesquisas para sua aplicação em fins energéticos (Pereira, 2022). Conforme o autor, o vegetal é cultivado em larga escala na China e Índia para as indústrias de celulose, e o Brasil é o país americano com maior diversidade de espécies de bambu. São 34 gêneros, 232 espécies, onde 75% são endêmicas.

Ainda conforme Pereira (2022), o cavaco de bambu quando comparado ao cavaco de eucalipto tem suas propriedades físico-químicas muito similares, somente com o teor de cinzas do bambu superior 17 vezes ao cavaco de eucalipto. O autor avaliou a queima de cavaco de bambu em uma caldeira de capacidade 40 ton de vapor por hora a 15 barg. O autor apresenta que não houve impacto na caldeira quando foi alterado o combustível cavaco de eucalipto para uma blenda de 50% cavaco de eucalipto e 50% cavaco de bambu, porém, o autor relata que como o cavaco de bambu possui menos umidade, houve muito mais presença de impurezas no recebimento do combustível.

O resíduo industrial mais utilizado como biocombustível é o bagaço de cana-de-açúcar. Conforme Barbosa, Santos e Oliveira (2018), o bagaço da cana-de-açúcar antes era um impacto ambiental e sem destino para as indústrias do setor sucroalcooleiro, se tornou uma solução quando adicionado a fornalhas das caldeiras da indústria. Conforme o autor, por este motivo, o setor continuamente busca investimento e inovações para manter-se sustentável no mercado.

Ainda conforme Barbosa, Santos e Oliveira (2018), a cada tonelada de cana-de-açúcar processada, são dispostos 275 kg de bagaço. A qualidade do bagaço é de suma importância e o parâmetro operacional mais avaliado é a umidade, recomendando-se a queima de bagaço em 50% de umidade, pois, acima desse percentual, o bagaço não queima em suspensão e se acumula nas grelhas da caldeira.

Conforme Mantovan (2022), uma biomassa com grande potencial energético disponível na região oeste paranaense em grande escala é o lodo flotado proveniente de

sistemas de tratamento de efluente de abatedouros, recomendado para utilização em co-combustão com o combustível principal de caldeiras (cavaco de eucalipto). A autora ressalta que o biocombustível tem sido estudado por vários autores, com o objetivo de caracterizar a biomassa, as emissões gasosas produzidas pela queima deste, e o potencial energético.

Considerando a disponibilidade na região oeste de produtos da cadeia industrial da soja, como farelo e casca, que são materiais nobres utilizados principalmente para nutrição animal. Visando a possibilidade de possíveis descartes desses produtos por algum critério de qualidade, onde, todas as indústrias de processamento de soja possuem caldeiras, julga-se interessante estudos sobre a destinação desses materiais ser a queima dentro de suas industrias geradoras.

O trabalho de Hochscheidt *et al*. (2016) consistiu em realizar a avaliação físico-química e energética de blendas de farelo de soja com bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto. Foi observado durante o estudo que, ao aumentar a concentração de farelo de soja na blenda de bagaço e serragem, aumentava o poder calorífico da mistura. Entretanto, também foi observado que pela composição do farelo possuir alta quantidade de proteína e sais minerais, ao aumentar a concentração de farelo na blenda, aumentava-se o teor de cinzas. Ou seja, é possível queimar esse material em caldeiras, porém recomenda-se atenção para ajustes operacionais dos geradores de vapor evitando acúmulo de material inerte no leito de grelhas.

Nas tabelas 3, 4 e 5 é possível verificar a caracterização das biomassas citadas acima, onde, o cavaco de eucalipto é utilizado para comparação de sua composição, haja vista que é a biomassa florestal mais utilizada em caldeiras, em que na Tabela 3 se encontra o poder calorífico superior para as biomassas estudadas, a Tabela 4 apresenta a caracterização imediata contendo o teor de carbono fixo, material volátil e cinzas das diferentes alternativas e a Tabela 5 contém os dados de composição elementar das alternativas, demonstrando o teor de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre.

TABELA 4 - CARACTERIZAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DE DIFERENTES BIOMASSAS

Combustível	PCS (MJ/kg)	Referência
		(continua)
Cavaco de eucalipto	18,8	Mantovan (2022)
	19,01	Fagnani (2017)
	20,8	Virmond (2007)
	19,54	Média
Lodo de ete frigorifico de aves	27,2	Mantovan (2022)
	26,57	Fagnani (2017)
	24,34	Virmond (2007)
	26,04	Média

TABELA 5 - CARACTERIZAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DE DIFERENTES BIOMASSAS

Combustível	PCS (MJ/kg)	Referência
		(conclusão)
Bambu	18,51	Vale, Moreira e Martins (2017)
	17,0	Guarnetti (2013)
	17,91	Guimarães Jr, Novack e Botaro (2010)
	17,81	Média
Casca de soja	17,73	Oliveira (2015)
	15,33	Zanatta (2012)
	16,84	Paula *et al*. (2011)
	16,63	Média
Bagaço de cana-de-açúcar	18,05	Araújo (2021)
	18,7	Arantes (2014)
	16,11	Paula *et al*. (2011)
	17,62	Média
Resíduo de farelo de soja	17,55	Pereira e Seye (2014)
	19,45	Hochscheidt *et al*. (2016)
	18,21	Média
Sorgo	17,97	Olanrewaju *et al*. (2023)
	17,70	Sartori *et al*. (2016)
	18,00	Oliveira (2016)
	17,89	Média

FONTE: A autora (2024).

TABELA 6 - CARACTERIZAÇÃO IMEDIATA DE DIFERENTES BIOMASSAS

Combustível	% Carbono Fixo	% Material Volátil	% Cinzas	Referência
				(continua)
Cavaco de eucalipto	15,55	84,45	0,60	Mantovan (2022)
	19,18	79,41	1,42	Fagnani (2017)
	17,54	81,94	0,52	Virmond (2007)
	17,42	81,93	0,85	Média
Lodo de ete frigorifico de aves	6,53	92,88	8,31	Mantovan (2022)
	8,61	82,35	9,01	Fagnani (2017)
	8,40	74,80	12,30	Virmond (2007)
	7,85	83,34	9,87	Média
Bambu	17,13	78,98	2,04	Vale, Moreira e Martins (2017)
	15,26	82,25	2,49	Guarnetti (2013)
	13,41	81,52	4,80	Média
Casca de soja	7,73	79,02	5,21	Oliveira (2015)
	17,40	71,70	1,00	Zanatta (2012)
	18,24	76,61	5,15	Paula *et al*. (2011)
	14,46	75,78	3,79	Média

TABELA 7 - CARACTERIZAÇÃO IMEDIATA DE DIFERENTES BIOMASSAS

Combustível	% Carbono Fixo	% Material Volátil	% Cinzas	Referência
				(conclusão)
Bagaço de cana-de-açúcar	15,18	76,92	7,90	Araújo (2021)
	16,14	79,29	2,92	Arantes (2014)
	8,30	82,55	3,90	Paula *et al*. (2011)
	13,21	79,59	4,91	Média
Resíduo de farelo de soja	13,60	80,00	6,40	Pereira e Seye (2014)
	14,39	71,60	5,63	Putun, Apaydin e Putun (2002)
	13,73	77,06	5,65	Média
Sorgo	17,96	71,14	0,15	Olanrewaju *et al*. (2023)
	20,07	74,76	5,17	Sartori *et al*. (2016)
	19,50	74,70	5,80	Oliveira (2016)
	19,18	73,53	3,71	Média

FONTE: A autora (2024).

TABELA 8 - COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DE DIFERENTES BIOMASSAS

Combustível	% C	% H	% O	% N	% S	Referência
Cavaco de eucalipto	47,01	7,27	45,67	<0,02	0,02	Mantovan (2022)
	49,68	6,29	43,08	0,43	<0,01	Virmond (2007)
	48,35	6,78	44,38	0,43	<0,01	Média
Lodo de ete frigorifico de aves	46,36	8,91	26,18	7,79	0,76	Mantovan (2022)
	20,60	9,48		2,48		Fagnani (2017)
	50,90	7,90	8,10	8,10	<0,3	Virmond (2007)
	39,29	8,76	17,14	6,12	0,76	Média
Bambu	47,00	6,00	45,00	0,90	0,80	Guarnetti (2013)
	45,51	6,44	47,92	0,08	0,05	Guimarães Jr. *et al*. (2010)
	46,26	6,22	46,46	0,49	0,43	Média
Casca de soja	39,27	5,76	52,95	1,96	0,06	Oliveira (2015)
	39,90	5,90	51,70	2,50		Zanatta (2012)
	42,50	6,50	49,00	1,60	0,30	Paula *et al*. (2011)
	40,56	6,05	51,22	2,02	0,18	Média
Bagaço de cana-de-açúcar	42,09	5,31	46,74	0,64	0,70	Arantes (2014)
Resíduo de farelo de soja	45,06	5,67	42,21	7,06		Pereira e Seye (2014)
	55,89	6,57	28,25	9,29		Putun, Apaydin e Putun (2002)
	50,48	6,12	35,23	8,18		Média
Sorgo	41,20	6,21	51,57	0,52	0,00	Olanrewaju *et al*. (2023)
	45,60	6,02	42,38	0,20	0,10	Oliveira (2016)
	43,40	6,12	46,98	0,36	0,10	Média

FONTE: A autora (2024).

4.5 QUEIMA DE RESÍDUOS EM UNIDADES GERADORAS DE VAPOR

Conforme Cortez, Lora e Gómez (2008), os resíduos presentes no Quadro 1 caracterizam fontes importantes de biomassa. Nesse contexto, os resíduos gerados em todo o mundo têm potencial de utilização para produção de energia.

No estado do Paraná, existe uma resolução que discorre sobre a queima de resíduos em caldeiras. A resolução em questão é a SEMA nº 42 de 22 de julho 2008, estabelecendo critérios, procedimentos e premissas para o processo de Autorização Ambiental para queima de resíduos em unidades geradoras de vapor (SEMA, 2008).

Dentre os principais requisitos determinados pela resolução ambiental, encontra-se a obrigatoriedade de não descaracterizar o combustível principal cuja caldeira foi projetada para queimar, onde não é permitida a queima de uma mistura de combustíveis em que o resíduo represente uma parcela acima de 20% do peso ou do poder calorífico da mistura. Ademais, faz-se necessário o monitoramento contínuo das emissões atmosféricas da unidade geradora de vapor, como medida preventiva a possíveis formações gasosas tóxicas que podem ser geradas mediante composição do resíduo a ser queimado (SEMA, 2008).

Além disso, a legislação delimita que a blenda de resíduo e combustível principal não deverá exceder a composição química dos elementos Cl, F, Sb, Cr, Cu, Mn, V e Sn em mais de 50% da composição do combustível principal e não possuir em sua composição concentrações dos elementos listados na Tabela 6 acima dos valores máximos permissíveis (SEMA, 2008).

TABELA 9 - LIMITES PERMISSÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE METAIS PESADOS EM RESÍDUOS

Elemento metálico	Concentração ($mg.kg^{-1}$)
As	1,0
Cd	0,5
Co	1,0
Hg	0,5
Ni	1,0
Pb	1,0
Se	1,0
Te	1,0
Tl	0,5

FONTE: SEMA (2008).

Como a combustão direta é um processo que gera, além da energia térmica, produtos da combustão (gases de combustão e cinzas), existe uma preocupação com a qualidade desses gases e a eficiência do processo.

Com relação à emissão dos gases, a composição da biomassa impactará na composição das emissões atmosféricas, sendo fundamental o conhecimento da composição elementar do combustível alternativo, pois quando resíduos são incinerados, podem ser liberados compostos tóxicos em forma de fração gasosa junto aos gases de combustão (Mantovan, 2022).

Esses constituintes liberados no meio devem ser controlados e existem legislações regulamentando as concentrações desses gases. Os gases comumente liberados são: CO_2, H_2O (vapor), SO_2, SO_3, CO, NO_X, e materiais particulados provenientes do arraste das cinzas (Meneghini, 2015).

No Paraná, a legislação que rege os requisitos e padrão de emissões gasosas de unidades geradoras de vapor é a Resolução nº 16 de 26 de março de 2014 da Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA, 2014). Abaixo, a Tabela 7 informa os parâmetros que devem ser cumpridos para atendimento a legislação estadual que controla as emissões atmosféricas, bem como a frequência de monitoramento.

TABELA 10 - PADRÕES ESTABELECIDOS DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS PARA GERADORES DE CALOR OU ENERGIA QUE UTILIZEM DERIVADOS DE MADEIRA COMO COMBUSTÍVEL

Potência Térmica Nominal MW	Densidade colorimétrica	MP-total mg/Nm³	CO mg/Nm³	NOx mg/Nm³	SOx mg/Nm³	Automonitoramento – Amostragem	
						Parâmetros	Frequência
Até 0,05		560	5.000	NA	NA		Anual
Entre 0,05 e 0,15		560	2.500	NA	NA	CO ou MP-total, O_2	Anual
Entre 0,15 e 1,0		560	1.300	NA	NA		Anual
Entre 1,0 e 10	20% equiva-lente ao	560	1.000	NA	NA		Semestral
Entre 10 e 30	Padrão 1 da Escala	400	2.000	500	NA		Semestral
Entre 30 e 50	Ringelmann	200	2000	500	NA	MP-Total, CO, NO_x e O_2	Semestral Semestral
Entre 50 e 70		200	1000	500	NA		Semestral
Entre 70 e 100		100	1000	500	NA		Semestral
Acima de 100		100	500	500	NA		Contínuo

FONTE: SEMA (2014).

4.6 CARACTERIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS PARA FINS ENERGÉTICOS

Visando obter um aproveitamento eficiente de qualquer material sólido polidisperso em suas diferentes aplicações, é necessário primeiramente realizar a seleção prévia das frações mais apropriadas para a cada finalidade (Cortez; Lora; Gómez, 2008). Com o objetivo da queima em superfície de grelhas em caldeiras, a seguir está a descrição das principais propriedades dos combustíveis sólidos.

4.6.1 Teor de Umidade

O teor de umidade de um combustível sólido é um dos principais parâmetros a serem monitorados, pois afeta o rendimento da combustão, reduzindo o poder calorífico e impactando o custo de transporte dos combustíveis. A umidade do combustível pode variar entre concentrações baixas até superiores a 50% da massa do combustível (Mantovan, 2022).

O limite autotérmico para a maioria das biomassas combustíveis é de 65%. Acima desse ponto, energia suficiente é liberada pela combustão para realizar a evaporação do montante de água e métodos diferentes de aproveitamento térmico da biomassa precisam ser requeridos como biodigestão e fermentação (Fagnani, 2017). Além disso, o elevado teor de umidade torna a ignição pobre, reduz a temperatura de combustão, dificulta a combustão dos produtos da reação, afetando a qualidade da combustão.

O teor de umidade de um combustível, descrito pela metodologia ABNT NBR 14929 (ABNT, 2017), é obtido pela Equação 1 abaixo:

$$Teor\ de\ umidade\ (\%) = \frac{Mu-Mo}{Mo} \times 100 \quad (1)$$

Onde, Mu é a massa de umidade e Mo é a massa do combustível seco.

Existem diferentes equipamentos portáteis eletrônicos no mercado para análise de umidade de combustíveis sólidos, facilitando a caracterização do combustível em processos industriais. Entretanto os métodos mais precisos são os laboratoriais.

4.6.2 Composição Imediata

A composição imediata de uma amostra de combustível é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono fixo, voláteis, umidade e cinzas (Cortez; Lora; Gómez, 2008). Ou seja, a composição imediata representa a parte do material que se queima em

estado gasoso (fração volátil), no estado sólido (carbono fixo) e a parcela da fração inerte da queima (teor de cinzas) (Corradi, 2021).

Os voláteis são relevantes durante a ignição e etapas iniciais da queima da biomassa, dessa forma, combustíveis com alto teor de voláteis queimam rapidamente (Brasil *et al*., 2021).

O teor de cinzas corresponde pelos componentes minerais absorvidos pela biomassa, sendo os principais íons minerais presentes da biomassa: cálcio, magnésio, potássio, enxofre, silicatos, sulfatos, carbonatos, cloretos, dentre outros. Quanto menor o teor de cinzas maior será o aproveitamento durante o processo de queima, pois as cinzas não contribuem para o poder calorífico do combustível (Brasil *et al*., 2021). O teor de cinzas e voláteis está diretamente relacionado ao cultivar da biomassa.

O teor de carbono fixo é o responsável pelo tempo de residência do combustível no reator de queima, e é queimado somente após a liberação da fração volátil e umidade do combustível (Mantovan, 2022).

Na Tabela 8 é possível observar a composição imediata de diferentes biomassas, sendo os valores apresentados em base seca:

TABELA 11 - COMPOSIÇÃO IMEDIATA DE DIFERENTES BIOMASSAS

Tipo de Biomassa	Composição Imediata (%)		
	Teor de Voláteis	Teor de Cinzas	Teor de Carbono Fixo
Pinus	82,54	0,29	17,7
Eucalipto	81,42	0,79	17,82
Casca de arroz	65,47	17,89	16,67
Bagaço de cana-de-açúcar	73,78	11,27	14,95
Casca de coco	67,95	8,25	23,8
Sabugo de milho	80,1	1,36	18,54
Ramos de algodão	73,29	5,51	21,2

FONTE: Cortez, Lora e Gómez (2008).

4.6.3 Análise Elementar

A composição elementar da biomassa é o conteúdo de massa de carbono, hidrogênio, enxofre, oxigênio e nitrogênio. Conforme Cortez, Lora e Gómez (2008), “é a característica técnica mais importante do combustível e constitui a base para análise dos processos de combustão, tais como volumes de ar, gases e entalpia e poder calorífico”.

A análise para determinar esse parâmetro consiste em realizar a combustão dinâmica da biomassa seca e moída em um reator de combustão, onde os produtos da

combustão são analisados em um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva (Brasil *et al.*, 2021).

A partir do conhecimento da composição elementar do combustível é possível a determinação da relação de ar-combustível para queima, sendo este parâmetro diretamente relacionado à eficiência da combustão e da qualidade das emissões gasosas.

4.6.4 Poder Calorífico

O poder calorífico de um combustível é uma das mais importantes propriedades da biomassa quando se pensa na combustão direta da mesma como fonte de energia em substituição aos combustíveis derivados de petróleo (Queiroz; Ferreira; Rambo, 2014). Seu valor é influenciado pela constituição do material, como: teor de cinzas, umidade, lignina e extrativos.

O poder calorifico é definido como a quantidade de calor desprendida através da oxidação completa de um material por unidade de massa desse combustível sob determinadas condições (Boumanchar *et al*., 2016).

Pode ser expresso em termos de Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI).

O Poder Calorífico Superior (PCS) é a quantidade de energia liberada pela biomassa durante a combustão, sendo a quantidade máxima de energia que pode ser obtida através da transferência de calor do combustível (Vieira, 2012).

O Poder Calorífico Inferior (PCI) é a quantidade de calor liberado durante a combustão, sendo a água em estado gasoso. O PCI é calculado através do PCS em função do teor de umidade e hidrogênio presentes no combustível. Corresponde a quantidade de calor útil para acontecer a queima da biomassa (Vieira, 2012).

A determinação desse montante de energia por unidade de combustível é fundamental para a escolha do processo termoquímico mais adequado a biomassa.

4.6.5 Teor de Cloro

O cloro é um micronutriente essencial às plantas, presente na forma iônica na estrutura, tem como função a mobilidade durante a fotossíntese (Kusunoki *et al*., 2007). A sua deficiência pode prejudicar o desenvolvimento do cultivar, afetando indiretamente o crescimento das plantas, pois implica a abertura e fechamento das células estomáticas.

A absorção de cloro na matéria varia de acordo com a espécie, no entanto, é pouco conhecido como o cloro é acumulado na biomassa e a correlação deste com a cultura e manejo do cultivar (Silvério, 2016).

Conforme Cândido (2019), durante a combustão de biomassas florestais são produzidas cinzas de fundo e cinzas volantes. As cinzas volantes são a fração mais fina e possui na composição cloretos, sulfatos, chumbo e zinco. A fração grosseira possui elementos metálicos cálcio, magnésio, silício, alumínio, ferro, manganês e fósforo.

A formação de cinzas volantes é prejudicial para os equipamentos onde ocorre a troca térmica dos gases em fornalhas ou queimadores, provocando corrosão e incrustação em superfícies do sistema, bem como poluição atmosférica devido à possível formação de dioxinas e furanos.

O mecanismo de corrosão promovido pelo cloreto na combustão passa pela etapa de formação do ácido clorídrico, que penetra entre os poros e rachaduras do aço, formando cloreto de ferro, que volatiza na temperatura em que ocorre a combustão, cerca de 500 °C, e é oxidado na presença de oxigênio, liberando o cloro gasoso, Cl_2 (Cândido, 2019).

Conforme Escobar (2016), as culturas energéticas plantadas produzidas em regiões tropicais – como o Brasil – possui concentração de cloro e outras substâncias inorgânicas superiores às taxas permitidas em normas internacionais, como ENplus e outras para produção de biocombustíveis sólidos, sendo os valores máximos permitidos em presença de cloro no combustível de 0,2 a 0,3 %. Segundo o autor, a propensão a formação de dioxinas em função do cloro da biomassa brasileira é a problemática do uso da biomassa brasileira no mercado mundial de biomassa.

4.6.6 Teor de Metais Pesados

Conforme Mantovan (2022), o teor de metais pesados presentes na composição do combustível a ser utilizado num processo de combustão é uma informação importante para as questões de proteção ambiental e saúde humana, principalmente se tratando da queima de resíduos.

Os metais pesados presentes na biomassa após o processo de combustão podem ser liberados através dos gases de combustão para a atmosfera ou então fixados na fração inerte do combustível, as cinzas. O mercúrio e selênio são voláteis, emitidos dessa forma pela fração gasosa. Cádmio e chumbo podem ser volatilizados e podem estar presentes na fração sólida, e o cromo e outros metais não voláteis serão fixados nas cinzas (NAEI, 2016).

A Resolução SEMA nº 42 de 22 de julho de 2008 estabelece critérios para a queima de resíduos em caldeiras, e determina os valores máximos permitidos da concentração de metais pesados em um resíduo para incineração, conforme Tabela 6. Não é permitido o uso para fins energéticos de resíduos que possuam em sua composição, elementos com concentração superior ao estabelecido na resolução.

4.6.7 Composição da fração inerte do combustível

De acordo com Vieira (2012), as cinzas são resultado da combustão da biomassa a elevadas temperaturas, tornando necessário o conhecimento da composição e o comportamento das cinzas para evitar operações inadequadas, como formação de escória e processos corrosivos.

As cinzas podem ser originadas a partir de elementos metálicos presente na composição do combustível, bem como de argila, areia e sais que podem ser transportados com a biomassa, provenientes da colheita ou manuseio (Vieira, 2012).

O teor de cinzas presentes na biomassa é avaliado a partir da análise imediata, e, a composição da fração inerte pode ser avaliada a característica elementar através da espectroscopia de fluorescência de raio X (Mantovan, 2022). O teor de cinzas de alguns resíduos agroindustriais que podem ser utilizados como combustível pode ser verificado na Tabela 9.

TABELA 12 - TEOR DE CINZAS PRESENTE EM DIFERENTES BIOMASSAS

Biomassa	Teor de Cinzas (%)	Referências
Casca de arroz	22,6	Demirbas (2004)
	23,84	Morais *et al*. (2011)
	20,6	Nogueira (2007)
	17,1	Diniz (2005)
Resíduos de soja	5,1	Werther *et al*. (2000)
Bagaço de cana-de-açúcar	11,3	Demirbas (2004)
	4,2	Katyal; Thambimuthu; Valix (2003)
Sabugo de milho	1,1	Demirbas (2004)

FONTE: Vieira (2012).

4.7 PROCESSOS DE INCRUSTAÇÃO E CORROSÃO EM CALDEIRAS

A procura por biomassas alternativas tem aumentado nos últimos anos, principalmente pela grande disponibilidade de material para queima e a neutralidade de CO_2, entretanto, espécies inorgânicas presentes em sua composição, como óxidos alcalinos e sais, podem acelerar processos de incrustações e escória, bem como processos corrosivos nas estruturas da caldeira (Mantovan, 2022). Esses processos podem reduzir drasticamente a vida útil de equipamentos geradores de vapor.

Conforme Winegartner (1974) *apud* Mantovan (2022), a correlação para avaliar a tendência de incrustações leva em consideração a soma dos compostos inorgânicos básicos que possuem a propriedade de variar o ponto de fusão das cinzas. A Equação 2 apresenta a correlação de Winegartner. O numerador da equação indica as substâncias que

reduzem o ponto de fusão das cinzas, e o denominador, as substâncias inorgânicas que elevam o ponto de fusão.

$$B/A = \frac{Fe_2O_2 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \quad (2)$$

De acordo com Munir (2010) *apud* Mantovan (2022), quando a relação B/A for menor que 0,5 a tendência de incrustação é baixa, entre 0,5 e 1 apresenta média incrustação, entre 1 a 1,75 representa alta incrustação e acima de 1,75 o valor indica extremamente elevada tendência de incrustação. Os autores relatam que a equação não pode ser o único parâmetro para julgar propensões de deposição de cinzas devido a essa equação ter sido proposta para avaliação de combustíveis fósseis com baixo teor de fósforo.

A Equação 3 apresenta a correlação utilizada para determinação do índice de tendência de formação de escórias associado a queima de um combustível.

$$R = B/A\, S \quad (3)$$

Se o valor de R for inferior a 0,6 a tendência de formação de escória é baixa, entre 0,6 a 2 é média, 2 a 2,6 alta, e valores acima de 2,6 indica uma tendência extremamente alta de formação de escória nas estruturas da caldeira. Entretanto, Mantovan (2022) relata que a composição da fração inorgânica de biomassas é distinta dos combustíveis fósseis, onde a presença de sais e óxidos alcalinos podem agravar os problemas com incrustação, escória e corrosão em caldeiras.

O autor Bryers (1996) indica que diferentes composições de combustíveis podem ser a fonte de problemáticas relacionadas a ocorrência de corrosão, incrustação e escória em fornalhas de caldeiras industriais.

A formação de escória é catalisada em temperaturas superiores a 570 °C com a presença de metais pesados. A formação de incrustação é devido a sinterização ou fundição das cinzas devido a condensação de espécies voláteis, ocorrendo a reação entre sulfatos e óxidos e sulfatos fundidos, em temperaturas de gases de combustão de 648 a 1037 °C. Haja vista, a maioria das caldeiras industriais opera com temperatura superior a 500 ºC, facilitando o desenvolvimento de reações que desenvolvam os processos de corrosão, incrustação e formação de escória.

Conforme Ganapathy (2019), toda vez que queimado um combustível em caldeiras que possua em sua composição enxofre, será formado vapor de água e SO_2 e SO_3. A partir disso, é formado condensação de ácido sulfúrico nas superfícies de troca de calor, levando a processos corrosivos que podem destruir as estruturas de uma caldeira.

Esse processo é acelerado quanto menor a temperatura de condensação do ácido sulfúrico, variando devido a temperatura de emissões gasosas da caldeira e as caraterísticas do combustível utilizado.

Conforme Retschitzegger, Brunner e Obernberger (2015), a combustão de biomassas podem formar gases ácidos que condensam com a temperatura significativamente acima do ponto de orvalho da água, devendo este ser um fator operacional a ser observado em geradores de vapor.

Os principais gases ácidos que podem ser formados são: ácido clorídrico, ácido sulfuroso, ácido nítrico e ácido sulfúrico. O ácido sulfúrico é o mais problemático, pois possui a maior temperatura de condensação, variando entre 100 e 190 ºC, conforme a concentração de ácido no gás de combustão (Retschitzegger, Brunner e Obernberger, 2015).

Para evitar a condensação de um gás de combustão em uma caldeira, deve ser mantida as temperaturas das estruturas sempre acima da temperatura de condensação do gás. A temperatura de condensação do ácido sulfúrico pode ser obtida através da equação abaixo (Ganapathy, 2019).

$$H_2SO_4: \frac{1000}{T_{DP}} = 2{,}276 - 0{,}02943 \ln\left(p_{H_2O}\right) - 0{,}0858 \ln\left(p_{SO_3}\right) + 0{,}0062 \ln\left(p_{H_2O}\right) \ln\left(p_{SO_3}\right) \quad (4)$$

4.8 MÉTODOS MULTICRITÉRIO PARA TOMADA DE DECISÃO

A tomada de decisões está inserida nas múltiplas faces do cotidiano. Escolha por alimentos, cores, entretenimento, profissão. Desde o caminho escolhido para alcançar um destino geográfico até escolhas que possam impactar a saúde financeira de um país, os métodos de apoio à tomada de decisão auxiliam a escolher alternativas sem parcialidade pela personalidade e preferência das pessoas envolvidas no processo decisório, garantindo que a escolha sempre seja a melhor alternativa (Souza, 2019).

Os métodos multicritério para apoio à tomada de decisão (MCDM) são técnicas de apoio em caso de problemas onde objetivos econômicos, ambientais, sociais, institucionais, técnicos e estéticos conflitantes podem estar envolvidos em uma escolha. Esta multidimensionalidade é uma característica da maioria das questões relativas ao desenvolvimento da sociedade atual.

Os MCDM permitem que o uso de critérios heterogêneos como custos e benefícios do projeto, qualidade ambiental em termos físicos e em termos qualitativos, impacto social

em termos não monetários e até descrições verbais de estética influenciem a tomada de decisão sem tornar a escolha parcial e tendenciosa (Montis *et al*., 2004).

Conforme Hajkowicz e Collins (2007) *apud* Vilela (2019), MCDM podem ser classificados em 5 categorias, descritas abaixo:

1 – *Multi Attribute Value Theory*: utiliza das funções de utilidade para definir expressão para as preferências do autor. A escolha de preferências, segundo o autor, pode ser cognitivamente desafiadora e demorada;

2 – *Pairwise comparisons*: envolve a comparação entre pares de critérios, avaliando qual critério se sobrepõe ao outro. As principais técnicas são o AHP, MAC-BETH e ANP. Pela simplicidade dos métodos, o AHP é um dos métodos mais utilizados no mundo, entretanto, possui limitações de alternativas a serem comparadas ao mesmo tempo;

3 – *Outranking approaches*: baseado no princípio de que uma alternativa pode ser dominante sobre outra, ao invés de assumir uma solução ótima. Os métodos que utilizam deste princípio são: PROMETHEE e ELECTRE. Esses métodos são apropriados quando as métricas dos critérios e as escalas de mensuração variam em amplos intervalos e as unidades são incomparáveis;

4 – *Distance to ideal point methods*: as alternativas são avaliadas e ranqueadas com base em sua distância do ponto ideal. A alternativa com menor distância do ponto ideal é a melhor alternativa, como o método TOPSIS, MOORA e CP. O autor retrata que a principal vantagem destes métodos é a capacidade não limitada de alternativas e critérios;

5 – Outros métodos: podem existir outros métodos que não se enquadram nas categorias acima, devido a ampla gama de métodos desenvolvidos, como por exemplo, métodos *fuzzy* e híbridos.

No Quadro 2 é possível observar os principais métodos de apoio a tomada de decisão.

QUADRO 2 - TÉCNICAS DE APOIO A TOMADA DE DECISÃO

Acrônimo	Método	Primeira referência
		(continua)
ELECTRE	Eliminação e escolha que expressam a realidade	Benayoun; Roy; Sussman (1966)
WSM	Método da soma ponderada	Fishburn (1967)
CP	Programação por compromisso	Srinivasan; Shocker (1973)
DEMATEL	Laboratório de avalição e julgamento	Gabus; Fontela (1973)
LINMAP	Técnica de programação linear para análise multidimensional e preferência	Srinivasan; Shocker (1973)
MAUT	Teoria do utilitário de atributos múltiplos	Keeney; Raiffa (1976)
SMART	Técnica simples de classificação de múltiplos atributos	Keeney; Raiffa (1976)

QUADRO 3 - TÉCNICAS DE APOIO A TOMADA DE DECISÃO

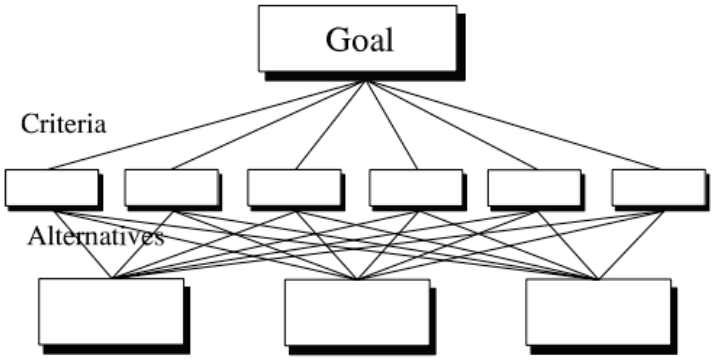
Acrônimo	Método	Primeira referência
		(conclusão)
CBR	Raciocínio baseado em casos	Schenk; Pinkert (1977)
AHP	Processo analítico hierárquico	Wind; Saaty (1980)
SAW	Ponderação aditiva simples	Hwang (1981)
TOPSIS	Técnica para ordem de preferência por semelhança com a solução ideal	Hwang (1981)
EVAMIX	Avaliação de dados mistos	Voogd (1983)
PROMETHEE	Método de organização de classificação de preferências para enriquecimento de avaliações	Brans; Vincke (1985)
DEA	Análise por envoltória de dados	Ahn; Charnes; Cooper (1987)
GA	Algoritmo genético	Goldberg; Holland (1988)
REMBRANDT	Estimativa de proporção em magnitudes ou decibéis para avaliar alternativas que não são dominadas	Lootsma (1993)
COPRAS	Avaliação proporcional complexa	Zavadskas; Kaklauska; Sarka (1994)
NAIADE	Nova abordagem para avaliação imprecisa e ambientes de decisão	Munda (1995)
ANP	Processo analítico de rede	Saaty (2001)
VIKOR	Solução de otimização e compromisso multicritério	Opricovic (2002)
MAVT	Teoria do valor de atributos múltiplos	Hostmann *et al*. (2005)
MOORA	Otimização multi-objetivo com base na análise Ration	Brauers; Zavadskas (2006)
ARAS	Avaliação da relação aditiva	Kersuliene; Zavadskas; Turskis (2010)
SWARA	Análise passo a passo da relação de avaliação de peso	Kersuliene; Zavadskas; Turskis (2010)
MULTIMORRA	Formulário multiplicativo com otimização multi-objetivo com base na análise Ration	Brauers; Zavadskas (2010)
WPM	Método do produto ponderado	Wang; Mingxi (2010)
WASPAS	Avaliação de produto de soma agregada ponderada	Zavadskas; Kazimieras (2012)

FONTE: Adaptado de Vilela (2019).

4.8.1 Método AHP

O método AHP, do inglês *Analytic Hierarchy Process*, é uma das ferramentas mais utilizadas. Foi desenvolvido por Saaty (1980), e se baseia na teoria de que o problema deve ser desmembrado em três níveis hierárquicos, sendo: objetivo, critérios e alternativas, respectivamente. A Figura 4 representa o esquema dos três níveis hierárquicos.

FIGURA 4 - TRÊS NÍVEIS HIERÁRQUICOS



FONTE: Saaty e Vargas (2012).

Conforme Martinéz (2016), o método possui três princípios, sendo:

- Estrutura do modelo;
- Comparação das alternativas e critérios;
- Avaliação da consistência dos resultados.

A comparação das alternativas e critérios deve ser realizada por especialistas no assunto e deve ser utilizada a escala fundamental de Saaty, conforme a tabela 10.

TABELA 13 - ESCALA FUNDAMENTAL DO MÉTODO AHP

Intensidade da importância na escala absoluta	Definição dos julgamentos	Explicação
1	Igual Importância	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem uma atividade sobre a outra
5	Importância essencial/forte	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida e sua dominância é demonstrada na prática
9	Extrema importância	A evidência favorecendo uma atividade sobre a outra é a de maior ordem de afirmação possível
2,4,6,8	Valores intermediários entre dois julgamentos	Quando ponderação é necessária entre os julgamentos

FONTE: Saaty (1980).

A obra de Montis *et al*. (2004) teve como objetivo a comparação do desempenho de quatro diferentes métodos de tomada de decisão: AHP, NAIADE, MAUT e MOP/GP, visando obter os pontos positivos e negativos dos métodos. Para o método AHP, foi proposto um

estudo de caso para avaliação de duas alternativas para o problema: planejamento do uso do território do Lago de Telese.

O autor ressalta que a aplicação do método obteve bom desempenho quando os critérios são interdependentes, quando as preferências são não lineares, onde o método é adequado para avaliar questões ambientais, de localização geográfica, que eram condições do caso estudado. Porém, a principal deficiência do método é a necessidade de muito tempo para a consideração dos pesos na escala elementar.

Na obra de Saaty e Vargas (2012, pág. 249), os autores propuseram uma avaliação sobre a legalização da eutanásia. Foram elencadas três alternativas:

1 - A prática atual aceitável é a eutanásia passiva, onde um médico pode suspender serviços médicos a pedido do paciente;

2 - Suicídio Assistido – Esta alternativa permitiria aos médicos prescrever medicamentos que os pacientes autoadministrariam;

3 - Eutanásia Ativa – Este é o extremo de todas as alternativas onde um médico injetaria letalmente um paciente terminal.

Os critérios selecionados foram: questões econômicas, morais, legais e preocupações de pacientes. Foram elencados como julgadores do processo: políticos, população geral, grupo religioso, associação de médicos e a associação *Hemlock*. Após os julgamentos aplicados através do método AHP, foi selecionado a alternativa *Status* Quo, afirmada pela análise de sensibilidade realizada no trabalho.

Além de auxiliar na escolha de alternativas, o método AHP também é utilizado como técnica adjacente para outros métodos para a definição de vetores pesos. O estudo de Souza (2019) tem por objetivo selecionar diferentes oleaginosas para o processo HEFA para produção de bioquerosene de viação. Nesse sentido, a autora propôs a utilização do método AHP para determinação dos pesos de cada critério para utilização do método TOPSIS para ranqueamento entre as oleaginosas estudadas.

A autora expõe que o método AHP foi selecionado para essa aplicação por ser baseado em matemática e psicologia, permitindo comparação de critérios qualitativos e considerando aspectos subjetivos na tomada de decisão.

4.8.2 Método TOPSIS

Conforme Martinéz (2016), o método TOPSIS, do inglês *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*, possui o conceito de que a melhor opção (alternativa) deve ser a mais perto da posição ideal, e mais longe da não ideal. Dessa forma, o método avalia o desempenho individual das alternativas em relação aos múltiplos critérios

(Souza, 2019). A solução ideal do método é a que maximiza os critérios de benefícios e minimiza os prejuízos.

O estudo de Sivalingam e Subramaniam (2024) apresenta a necessidade de método para seleção padrão de robôs colaborativos para operações de montagem industrial. Os autores apresentam a abordagem híbrida entre AHP e TOPSIS para elaborar um ranking entre as alternativas levantadas. O AHP foi usado no estudo para determinar o vetor de pesos dos sete critérios como entrada no método TOPSIS, para obter o ranking entre as doze alternativas. Os autores indicam que o método híbrido é simples e de fácil utilização como métodos de auxílio a escolha de robôs colaborativos.

A obra de Ullah *et al*. (2021) aborda a utilização de modelos MCDM para tomada de decisão para avaliação de diferentes alternativas de fontes de eletricidade renováveis híbridas (Solar, hidrelétrica, eólica e biomassa) para abastecimento de Ghulam Shah, no Paquistão. Os autores ressaltam que devem ser selecionados critérios apropriados e o método correto de tomada de decisão, para que fosse possível cumprir com os objetivos do estudo. Os métodos usados para o estudo foram: EDAS, TOPSIS e MOORA.

Neste estudo foram investigados doze cenários de configuração específico de fontes de energia, considerando critérios conflitantes, como: economia, confiabilidade, ecologia, sociedade e topografia. A alternativa escolhida pelos métodos utilizados na pesquisa definiram a mesma alternativa como ideal: conversor solar-hidro-biogás-bateria.

Na obra de Li *et al*. (2024), o TOPSIS é utilizado para avaliar os recursos geotérmicos no condado de Eryuan, na Índia, visando determinar o potencial de exploração geotérmica da área. Os autores afirmam que foram selecionados quantidade significativa de critérios e informações necessárias para o estudo através do sensoriamento remoto, porém, pode ser melhorado a qualidade das informações sobre as propriedades físico-químicas das rochas de cobertura.

Outro estudo relevante na área que utiliza do método TOPSIS para tomada de decisão foi publicado pelos autores Swathi e Vidjeapriya (2024). O estudo utilizou o TOPSIS para escolha de ligantes de baixo carbono para produção de concreto de alta resistência sustentável. Foram criados trinta e duas misturas de argamassas geopoliméricas variando a concentração de metacaulim, variando também a proporção de ativadores alcalinos e a concentração de hidróxido de sódio. As alternativas foram avaliadas com base em nove critérios, como: fluidez, tempo de pega inicial e final, resistência à compressão, retração inicial de secagem, consumo de energia, emissão de CO_2 e despesas financeiras.

Para Souza (2019), o método TOPSIS é aplicável no ranqueamento de alternativas de fonte energética por considerar o desempenho individual das alternativas frente aos múltiplos critérios que possam ser relacionados ao problema.

Segundo o trabalho de Durairaj *et al*. (2014), o método TOPSIS define que a melhor alternativa será a que estiver mais próxima dos pontos positivos (PIS) e pontos negativos (NIS). Conforme os autores, o TOPSIS é um método relativamente simples e rápido, com uma produção sistemática.

4.8.3 Método MOORA

O método MOORA, do inglês *Multi Objetive Optimization on the basis of Ratio Analysis*, foi desenvolvido por Brauers e Zavadskas em 2010. Conforme Brauers e Zavadskas (2006), o novo método proposto para otimização de multiobjetivos com alternativas discretas refere-se a uma matriz de respostas das alternativas como objetivo, pelo qual os pesos dos critérios são aplicados.

Os autores indicam que o conjunto de razões tem a raiz quadrada da soma dos quadrados das respostas como denominadores retornando um número adimensional, tornando o método muito preciso entre diferentes índices. As razões adimensionais são somadas em caso de maximização (critério de valor) ou subtraídas em caso de minimização (critério de custo), e por fim, o ranking é obtido de acordo com os rácios obtidos.

O trabalho de Gadakh, Shinde e Khemnar (2020) utiliza o método MOORA para otimização de parâmetros do processo de soldagem. Os autores aplicaram o método MOORA em seis diferentes problemas de soldagem, sendo estes: soldagem por arco submerso, soldagem a arco de gás tungstênio, soldagem a arco de metal a gás, soldagem a laser CO_2 e soldagem por fricção. O autor afirma que o método corrobora com as alternativas derivadas de pesquisadores que comprovam a aplicabilidade, potencialidade e flexibilidade do método em resolver problemas.

Na obra de Brauers *et al*. (2008), foi abordado um problema multiobjetivos da área de construção civil. O autor retrata que existe o lado do novo proprietário que quer um menor preço possível, ter confiança no empreiteiro, saber a duração da obra e a qualidade da obra. Existe também o lado do empreiteiro como a satisfação do cliente, diminuição de custos, redução de custo com funcionários. Foram convidados para participar do trabalho os quinze maiores empreiteiros da cidade de Vilnius, capital da Lituânia. O trabalho chegou as conclusões que o método MOORA obteve os mesmos resultados para os três primeiros do ranking comparado ao método de abordagem de ponto de referência.

Conforme Raju, Murali e Patnaik (2020), as abordagens de métodos de tomada de decisão também são adequadas para trabalhar com a complexidade de julgamentos da variedade de materiais. Os autores fizeram uso da abordagem híbrida do AHP-TOPSIS e AHP-MOORA para classificar os compostos de Al-CSA (compostos de cinza de alumínio e casca de coco). Os atributos foram: densidade, dureza, resistência à tração e tenacidade,

taxa de desgaste e coeficiente de atrito. Como alternativas foram avaliados 5 diferentes materiais. O ranqueamento obtido para os dois métodos foi exatamente igual.

O método MOORA, conforme Gadakh, Shinde e Khemnar (2020), pode ser aplicado com sucesso absoluto para resolver vários tipos de problemas complexos de tomada de decisão no ambiente de manufatura.

A combinação entre o método AHP e MOORA, conforme Utama, Asrofi e Amallynda (2020) é eficaz na resolução de inúmeros problemas, como seleção de processos, materiais e avaliação de riscos. Abaixo se encontram os detalhamentos dos métodos TOPSIS e MOORA.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi desenvolvida no Setor Palotina da Universidade Federal do Paraná. Trata-se de uma abordagem quantitativa de cunho descritivo, utilizando os métodos para interpretação e organização dos dados levantados em bibliografia (Costa Neto, 2002), através do levantamento de dados presentes em livros, trabalhos científicos, normas e metodologias publicadas, em bases de dados conhecidas como: Science Direct, Portal CAPES e pesquisas publicadas por universidades federais e estaduais (Gerhardt; Silveira, 2009). A pesquisa também se caracteriza exploratória, através dos questionários enviados para especialistas e técnicos da área de queima de biomassa em unidades geradoras de vapor industrial.

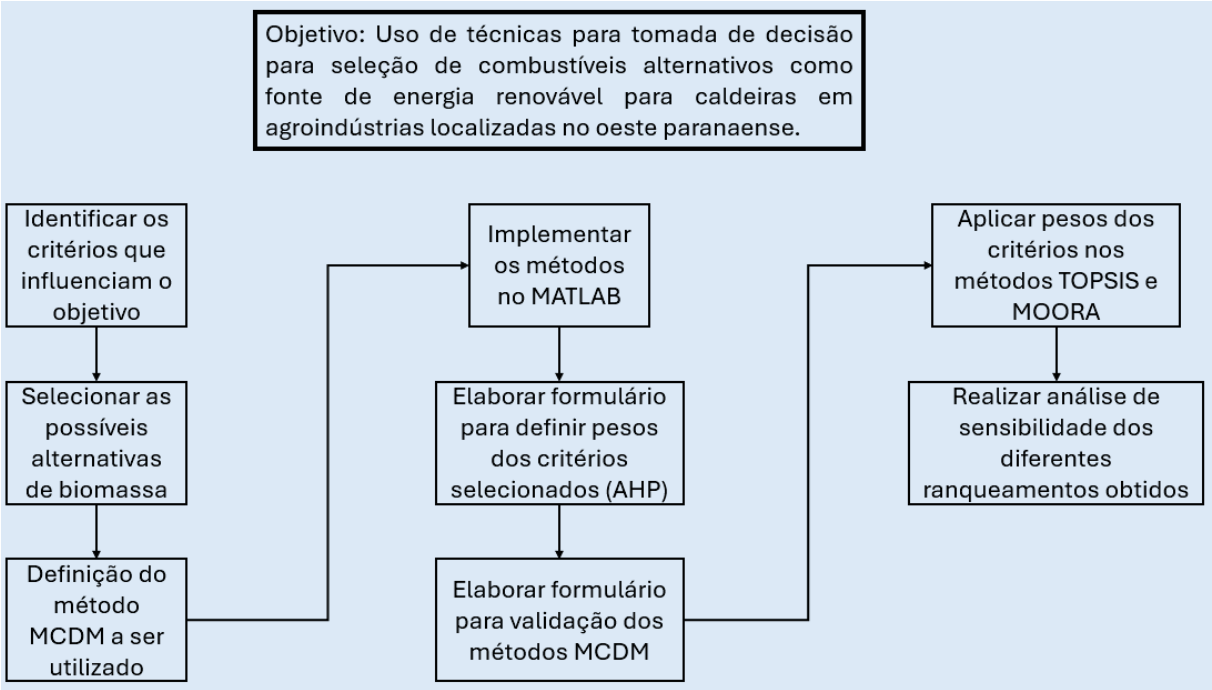
Considerando a futura escassez do principal combustível utilizado em caldeiras industriais (cavaco de eucalipto), a busca por alternativas para substituição parcial do cavaco de eucalipto é fundamental para a sustentabilidade dos processos que demandam vapor, respeitando legislações ambientais que norteiam e regulamentam a queima de combustíveis alternativos (como no caso do Paraná, a SEMA nº 42 de 22 de julho 2008 para queima de resíduos). Estudos apontam a oportunidade de uso de novas culturas lignocelulósicas ou resíduos industriais para complementação do cavaco de eucalipto, devendo ser utilizados em blendas com o combustível principal.

Porém, definir qual combustível complementar em uma caldeira industrial não deve ser uma atividade empírica, devendo ser embasada em critérios técnicos visando os impactos que podem ser gerados ao modificar o combustível para o qual o gerador de vapor foi projetado.

Através disso, a presente pesquisa aponta a metodologia de apoio à tomada de decisão com múltiplos critérios, para auxiliar o decisor a escolher a melhor opção dentre os critérios e alternativas apresentadas a ele.

A esquematização do procedimento metodológico é apresentada na Figura 5, apresentando resumidamente os métodos aplicados neste estudo.

FIGURA 5 - ESQUEMATIZAÇÃO DO PROCEDIMENTO METODOLÓGICO



FONTE: A autora (2024).

5.1 CONSTRUÇÃO DA MATRIZ DE DECISÃO

A matriz de decisão X (i,j) foi obtida através de dados da literatura. Abaixo é descrito o processo de definição dos critérios e alternativas selecionadas para este estudo. A metodologia utilizada para obter a caracterização das diferentes alternativas de biomassas foi conforme indicado em Souza (2019), Martínez (2016), Durairaj *et al*. (2014), Sivalingam e Subramaniam (2024), utilizando bases de dados fundamentadas para pesquisa, como o Portal de Periódicos Capes, publicações de dissertações e teses, *Scielo* e a plataforma *ScienceDirect*, com exceção dos preços de combustível e teor de umidade, onde os preços foram determinados através de pesquisa de mercado na região oeste paranaense, e, o teor de umidade determinado através de valores típicos.

5.1.1 Escolha dos critérios avaliados

A escolha dos critérios utilizados nesta avaliação foi baseada em aspectos de qualidade da biomassa. Entretanto, não foram considerados critérios correlacionados visando reduzir a ordem da matriz de decisão, onde a escolha se baseou na seleção de critérios que pudessem determinar a eficiência de queima do combustível alternativo e se a queima poderia ser prejudicial ao equipamento ou ao meio ambiente.

Relacionado à eficiência de queima do combustível, foram considerados os critérios: poder calorífico superior (Vieira, 2012), quantidade de material inerte expressos por teor de cinzas (Brasil *et al*., 2021) e teor de umidade (Cortez; Lora; Gómez, 2008).

Em termos de parâmetros que indicam que o combustível possa reduzir a vida útil do gerador de vapor, foram considerados os parâmetros: temperatura de condensação de H_2SO_4 (Retschitzegger; Brunner; Obernberger, 2015), teor de cloro (IARC, 2013), índice de tendência de formação de incrustação (B/A) e escória (R) (Winegartner, 1974). A temperatura de condensação de H_2SO_4 foi calculada utilizando o software *Engineering Equation Solver* (EES), conforme recomendado por Ganapathy (1989).

Relacionado aos fatores ambientais, foi considerado o teor de cloro presente no combustível, onde esse parâmetro está diretamente relacionado a presença de dioxinas e furanos nos gases de combustão emitidos para a atmosfera (Assunção; Pesquero, 1999).

Considerando o fator econômico, foi adicionado o critério preço do combustível (R$/ton de combustível) à matriz de decisão, devido ao fato de que para uma indústria utilizar um combustível alternativo, além de fatores regulamentares e ambientais, é necessário que este traga viabilidade econômica.

5.1.2 Escolha das alternativas selecionadas

Foram escolhidas biomassas utilizando o método não probabilístico, de forma não aleatória, com base na forte presença de estudos utilizando determinado tipo de biomassa alternativa como fonte de combustível, ou a probabilidade de disponibilidade de um determinado resíduo na região estudada.

Foram selecionadas as seguintes biomassas: cavaco de eucalipto, lodo centrifugado de ETE de frigorífico, bambu, casca de soja, bagaço de cana-de-açúcar, resíduo de farelo de soja e sorgo biomassa.

A Tabela 11 apresenta a matriz de decisão A (i,j), onde i representa as alternativas de biomassa e j os critérios. Os dados estão organizados com as respectivas referências indicadas ao lado direito do dado.

TABELA 14 - MATRIZ DE DECISÃO A (i,j): COMPARAÇÃO ENTRE CRITÉRIOS E ALTERNATIVAS

Alternativa	PCS (MJ/kg)	Teor de Cinzas (%)	Temperatura condensação H_2SO_4 (°C)	Referência	B/A	R	Teor de Cloro (%)	Referência	Umidade (%)	Preço (R$/ton)
Cavaco de eucalipto	18,8	0,85	77,32	Mantovan (2022)	3,46	0,03	0,05	Mantovan *et al*. (2022)	35,00	300,00
Lodo industrial de ETE	27,2	8,31	110,40	Mantovan (2022)	18,27	13,88	0,02	Mantovan *et al*. (2022)	55,00	-
Bambu	17,0	2,49	113,90	Guarnette (2013)	8,09	3,44	0,08	Maraver *et al*. (2016)	35,00	500,00
Casca de soja	17,73	5,21	91,82	Oliveira (2015)	7,71	1,39	0,00	Wherter *et al*. (2000)	10,00	650,00
Bagaço de cana-de-açúcar	18,7	2,92	113,50	Arantes (2014)	0,52	0,36	0,03	Maraver *et al*. (2016)	50,00	240,00
Resíduo de farelo de soja	19,5	6,40	84,66	Osborn (1977)	258,02	129,01	0,01	Osborn (1977)	12,50	2100,00
Sorgo biomassa	18,00	5,80	92,30	Oliveira (2016)	0,43	0,04	0,30	Maraver *et al*. (2016)	50,00	47,95

FONTE: A autora (2024).

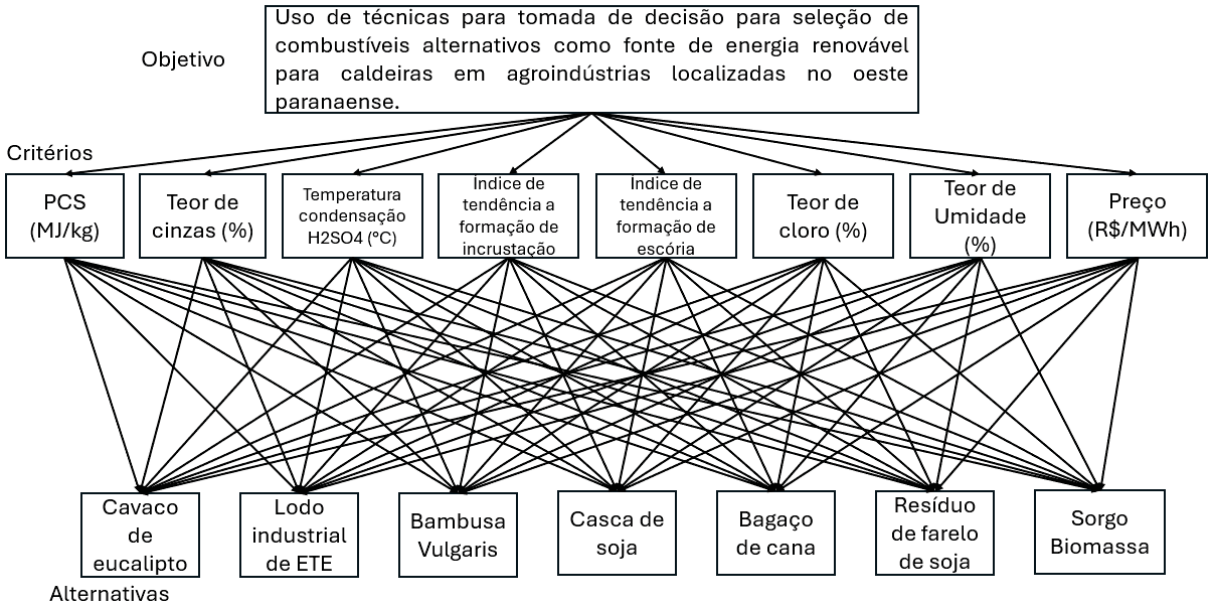
5.2 MÉTODO AHP

O método multicritério AHP foi utilizado na presente pesquisa para obtenção dos pesos dos critérios definidos que influenciam na escolha das alternativas levantadas. Conforme a tese de Souza (2019), o método utilizado é indicado por se tratar de um método baseado em matemática e psicologia, onde foram obtidos os julgamentos dos especialistas através de formulários online.

5.2.1 Detalhamento do método AHP

A pesquisa utilizou o modelo de hierarquia de três níveis de Saaty e Vargas (2012), onde a hierarquia se dá pelo objetivo, critérios e alternativas, respectivamente, conforme a Figura 4. Na Figura 6, se encontra a estrutura hierárquica do processo decisivo da presente pesquisa.

FIGURA 6 - ESTRUTURA HIERÁRQUICA DO PROCESSO DECISIVO DA PESQUISA



FONTE: A autora (2024).

Os autores Saaty e Vargas (2012) apresentam de forma breve os quatro axiomas do método AHP, que devem ser atendidos e observados em todas as execuções do método:

- Preocupação com a reciprocidade;
- Comparação de elementos homogêneos;
- Dependência hierárquica e sistêmica;
- Expectativas sobre a validade da classificação.

Sivalingam e Subramaniam (2024) dividem as etapas do processo para obtenção dos pesos de cada critério através do método AHP e sumarizam em três etapas básicas: identificação do problema, estruturação hierárquica identificando os fatores que influenciam a decisão e as potenciais soluções (alternativas) e aplicação da comparação paritária dos elementos em cada nível hierárquico utilizando a escala elementar, devendo estar ser realizada por especialistas.

Para obtenção da matriz de julgamentos entre critérios X (i,j), presente na Equação 4, são realizados julgamentos paritários com relação a importância de um critério frente a outro, onde os critérios estarão presentes nas colunas e nas linhas da matriz, seguindo a mesma ordem.

Conforme a escala elementar de Saaty presente na Tabela 10, a diagonal principal é a comparação de elementos iguais, sendo que a matriz de comparação par a par é caracterizada por uma matriz identidade, e cada elemento da matriz será obtido por julgamento de especialistas.

A Equação 5 apresenta a matriz de julgamentos par a par desta pesquisa, em que $x_{ii} = 1, x_{ji} = \frac{1}{x_{ij}}, x_{ij} \neq 0$. Na Tabela 12 se encontram a listagem dos 8 critérios. Os valores de cada elemento da matriz X (i,j) foram obtidos através de questionário aplicado aos especialistas que participaram do projeto.

$$X(i,j) = \begin{bmatrix} & C1 & C2 & C3 & C4 & C5 & C6 & C7 & C8 \\ C1 & 1 & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} & x_{17} & x_{18} \\ C2 & 1/x_{12} & 1 & x_{23} & x_{24} & x_{25} & x_{26} & x_{27} & x_{28} \\ C3 & 1/x_{13} & 1/x_{23} & 1 & x_{34} & x_{35} & x_{36} & x_{37} & x_{38} \\ C4 & 1/x_{14} & 1/x_{24} & 1/x_{34} & 1 & x_{45} & x_{46} & x_{47} & x_{48} \\ C5 & 1/x_{15} & 1/x_{25} & 1/x_{35} & 1/x_{45} & 1 & x_{56} & x_{57} & x_{58} \\ C6 & 1/x_{16} & 1/x_{26} & 1/x_{36} & 1/x_{46} & 1/x_{56} & 1 & x_{67} & x_{68} \\ C7 & 1/x_{17} & 1/x_{27} & 1/x_{37} & 1/x_{47} & 1/x_{57} & 1/x_{67} & 1 & x_{78} \\ C8 & 1/x_{18} & 1/x_{28} & 1/x_{38} & 1/x_{48} & 1/x_{58} & 1/x_{68} & 1/x_{78} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Construída a matriz de julgamentos X (i,j), os dados são normalizados através da Equação 6, obtendo a matriz Xn_{ij}.

$$Xn_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} x_{ij}} \quad (6)$$

Ao normalizar os dados, foi posteriormente identificado o autovetor WXn_i, presente na Equação 7, conhecido como vetor prioridades. Conforme Souza (2019), este vetor representa a ordem de prioridade dos critérios, retornando em escala decimal os pesos de cada critério.

$$WXn_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} xn_{ij}}{\mathrm{n}} \quad (7)$$

TABELA 15 - CRITÉRIOS CONSIDERADOS NO ESTUDO

Critério	Descrição
C1	PCS (MJ/kg)
C2	Teor de Cinzas (%)
C3	Temperatura de condensação de H_2SO_4 (°C)
C4	Índice de tendência a formação de incrustação
C5	Índice de tendência a formação de escória
C6	Teor de cloro (%)
C7	Teor de umidade (%)
C8	Preço (R$/MWh)

FONTE: A autora (2024).

Adiante, foi obtido através da Equação 8 a matriz de prioridades e o autovalor λ_{max} pela Equação 9, para que seja possível o cálculo do índice de consistência.

$$Xn_{ij} = x_{ij} * WXn_i \quad (8)$$

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\sum_{j=1}^{n} Xn_{ij}}{WXn_i} \div n \quad (9)$$

O índice de consistência CI é uma das principais vantagens do método AHP. Através da Equação 10, foi possível verificar a consistência dos julgamentos da matriz X (i,j), onde a verificação consiste em certificar que o autovalor máximo seja igual à ordem da matriz, em que n é igual ao número de critérios do problema (Coelho; Martins, 2011).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (10)$$

Conforme Ishizaka e Labib (2011) ***apud*** Souza (2019), para avaliar a real consistência da matriz de julgamentos é necessário obter a razão de consistência CR, que consiste em dividir o índice de consistência pelo índice randômico RI, conforme a Equação 11. Os valores de RI são obtidos através da Tabela 13. Caso CR seja inferior a 0,1 é considerado satisfatório o julgamento realizado pelos especialistas. Caso CR seja superior a 0,1 é necessário repetir os julgamentos.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (11)$$

TABELA 16 - ÍNDICE RANDÔMICO DE SAATY

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

FONTE: Saaty (1980).

5.2.2 Desenvolvimento do método AHP no Matlab

Conforme o estudo de Brandão, Vasconcelos e Sales (2022), é possível utilizar ambientes de software para facilitar a aplicação do método de apoio à tomada de decisão multicritério.

Neste estudo foi utilizado o software Matlab, onde foi criado algoritmo para aplicação do método AHP, disponível no Apêndice A.

5.2.3 Questionário on-line para obtenção da matriz de comparação par a par

Conforme Coelho e Martins (2011), contar com o apoio de especialistas para construir a matriz de comparação entre os critérios é uma boa prática para reduzir as interferências do método AHP.

Nesta pesquisa, foram convidados dois especialistas para responder ao questionário elaborado na plataforma *Forms* da Microsoft. O questionário pode ser verificado no Apêndice B, onde o objetivo do formulário foi obter os elementos da matriz de comparação entre critérios X (i,j).

5.3 RANQUEAMENTO DAS ALTERNATIVAS DE BIOMASSA

Para que fosse possível obter o ranqueamento das biomassas alternativas consideradas no estudo com base no desempenho destas em relação aos critérios avaliados através do método AHP, foram utilizados os métodos TOPSIS e MOORA. Os métodos foram selecionados pela facilidade de implementação em software e aplicabilidade destes em pesquisas.

5.3.1 Detalhamento do método TOPSIS

O método TOPSIS, conforme Godinho e Miranda (2014), possui abordagem voltada para encontrar alternativa que seja mais próxima a solução ideal em um espaço computacional multidimensional, sendo as dimensões deste espaço delimitadas pelos critérios dentro do processo de decisão.

Souza (2019) indica que antes de iniciar o método de decisão TOPSIS é necessário conhecer o desempenho de cada critério em relação a cada alternativa, sendo o primeiro passo do processo construir a matriz de desempenho, ou matriz de decisão, do processo decisivo.

Após definida a matriz de desempenho, foram normalizados os elementos da matriz através da Equação 6, produzindo a matriz normalizada Xn (i,j) presente na Equação 12, com o objetivo de transformar os valores das diversas dimensões em valores não dimensionais, permitindo dessa forma a comparação dos critérios decisórios.

$$Xn\ (i,j) = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^2}} \tag{12}$$

A partir do método AHP foi obtido o vetor W (1,j) presente na Equação 13, onde j é o peso do j-ésimo critério utilizado no processo de tomada de decisão. O somatório entre os pesos sempre será 1 (Souza, 2019).

$$W\ (1,j) = [w_{11} \quad w_{12} \quad \cdots w_{1j}] \tag{13}$$

Após, a matriz de decisão ponderada Wn_{ij} é obtida através da Equação 14, em que os elementos desta matriz são o produto entre o vetor peso e os elementos da matriz normalizada.

$$Wn_{ij} = W_{ij} * Xn_{ij} \tag{14}$$

Conforme Sivalingam e Subramaniam (2024), após a determinação da matriz ponderada, são definidas as soluções ideais positivas (PIS) e negativas (NIS).

A solução ideal positiva é demonstrada pela Equação 15, se caracterizando como uma solução que possui desempenho máximo em cada critério, possuindo os maiores valores em critérios de maximização e menores valores em critérios de minimização.

A solução ideal negativa, obtida pela Equação 16, por sua vez se caracteriza como a solução que possui menor desempenho em critérios de maximização e maior desempenho em critérios de minimização, onde I^+ é o conjunto de critérios de maximização (benefícios) e I^-de minimização (custo).

$$X^+ = \{X_1^+, \cdots, X_n^+\} = \{max_j X_{ij} | i \epsilon I^+\}, \{min_j X_{ij} | i \epsilon I^-\} \quad (15)$$

$$X^- = \{X_1^-, \cdots, X_n^-\} = \{min_j X_{ij} | i \epsilon I^+\}, \{max_j X_{ij} | i \epsilon I^-\} \quad (16)$$

Depois, é necessário o cálculo da distância euclidiana de cada critério com relação ao ideal positivo, obtida através da Equação 17, e a distância com relação ao ideal negativa, Equação 18.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (Wn_{ij} - X_j^+)^2} \quad (17)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (Wn_{ij} - X_j^-)^2} \quad (18)$$

Por fim, através do coeficiente de similaridade CI, obtido através da Equação 19, é determinada a proximidade relativa da alternativa X_i com relação às posições ideais. CI deve variar entre 0 e 1, onde, quanto mais próximo de 1, melhor a alternativa pois estará mais próximo da solução ideal (Souza, 2019).

$$CI = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (19)$$

5.3.2 Desenvolvimento do método TOPSIS no Matlab

Através do software Matlab, foi desenvolvido algoritmo para execução do método TOPSIS em software. O algoritmo está disponível no Apêndice C.

O algoritmo tem como produto o ranqueamento final das alternativas, onde é retornado no campo "*Command Window*" do software Matlab um vetor chamando "*ranking*" com número de linhas igual ao número de alternativas e apenas uma coluna, indicando em cada elemento a posição em que cada alternativa se posiciona.

5.3.3 Detalhamento do método MOORA

O método MOORA se inicia com a construção da matriz de decisão X (i,j), onde j são os critérios e i são as alternativas. O detalhamento do método se baseia no desenvolvimento da obra de Brauers e Zavadskas (2006).

Após definida a matriz de decisão X (i,j), são normalizados os elementos da matriz formando a matriz Xn (i,j), através da Equação 20.

$$Xn\ (i,j) = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^2}} \quad (20)$$

Cada elemento da matriz Xn (i,j), conforme Brauers e Zavadskas (2009), é um número adimensional representando a resposta de uma alternativa para um critério, pertencendo a um intervalo de 0 a 1.

Posteriormente, foi obtido a matriz normalizada ponderada Wn (i,j), conforme a Equação 21, em que W (1,j) é o vetor de peso dos critérios, apresentado pela Equação 22.

$$Wn\ (i,j) = W_{1j} * Xn_{ij} \quad (21)$$

$$W\ (1,j) = [w_{11} \quad w_{12} \quad \cdots w_{1j}] \quad (22)$$

Os valores finais são obtidos através da Equação 23, onde é realizado uma diferença entre os valores de maximização e minimização, em que j=1, 2, ..., g especificam os critérios a serem maximizados (critérios de ganho), e, j= g+1, g+2, ..., n especificam os critérios a serem minimizados (critérios de custo).

$$y_j^* = \sum_{j=1}^{g} Wn_{ij} - \sum_{j=g+1}^{j=n} Wn_{ij} \quad (23)$$

Um ranqueamento ordinal demonstra a ordem final obtida através do método, onde a melhor alternativa tem o maior valor y_j^* e é o primeiro colocado (ranqueamento com ordem decrescente).

5.3.4 Desenvolvimento do método MOORA no Matlab

Através do software Matlab, foi desenvolvido algoritmo para execução do método MOORA em ambiente computacional do software. O algoritmo está disponível no Apêndice D.

O algoritmo tem como produto o ranqueamento final das alternativas, onde é retornado no campo "*Command Window*" do software Matlab um vetor chamando *"ranking*" com número de linhas igual ao número de alternativas e apenas uma coluna, indicando em cada elemento a posição em que cada alternativa se posiciona.

5.4 VALIDAÇÃO DO RANQUEAMENTO

Com o objetivo de validar os ranqueamentos obtidos através dos métodos TOPSIS e MOORA foi enviado via correio eletrônico um questionário para dois especialistas e quatro técnicos que considerassem a matriz de decisão X (i,j) presente na Tabela 11 para realizar seu próprio ranqueamento.

O ranqueamento realizado pelos especialistas e técnicos simulam o processo decisivo que ocorre atualmente na indústria, supondo que, de forma oportuna, estes personagens são convidados a testar uma nova alternativa de biomassa para seus processos de geração de vapor.

Eventualmente, a oportunidade de testar combustíveis alternativos pode surgir através de contato comercial ou pela disponibilidade de um resíduo, no qual a indústria é a própria fonte geradora.

O questionário enviado foi elaborado na plataforma *Forms* da Microsoft e está presente no Apêndice E.

5.5 ESPECIALISTAS E TÉCNICOS

Foram definidas duas categorias de profissionais da área de geração de vapor para responder os questionários dos métodos de tomada de decisão: especialistas e técnicos.

Para a categoria especialista, foram selecionados dois profissionais que projetam equipamentos geradores de vapor industriais, com a atribuição de desenvolver diferentes equipamentos para variados segmentos.

Na categoria técnica, foram selecionados quatro profissionais da área operacional de geração de vapor, que possuem a atribuição de emissão de parecer técnico de compra ou teste de um combustível para caldeira industrial na indústria que atuam.

Foram atribuídos os dois modelos de questionário para os especialistas. Para os técnicos foi aplicado somente o questionário de ranqueamento das diferentes alternativas de biomassa. Os resultados obtidos nos questionários 1 e 2 estão presentes no Apêndice G e H, respectivamente.

5.6 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE KENDALL TAU

Para avaliar a conexão entre os resultados obtidos através dos métodos multicritério TOPSIS e MOORA e o ranqueamento realizado pelos especialistas, foi calculado o coeficiente de correlação de Kendall Tau, o teste T de Student e o p-valor para

cada combinação de técnica e especialista (Sarkodie, Ofosu e Ampimah, 2022; Bhojane *et al*. 2023; Abassi *et al*. 2024).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das pesquisas bibliográficas realizadas, foi possível obter a matriz de decisão presente na Tabela 11 contendo a caracterização dos parâmetros e alternativas de biomassas definidas neste trabalho.

Após o levantamento de dados, foram construídos os algoritmos para os métodos de decisão multicritério: AHP, TOPSIS e MOORA. Estes se encontram descritos nos Apêndices A, C e D, respectivamente.

6.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

A partir do formulário presente no Apêndice B enviado para os especialistas selecionados referente à aplicação do método AHP, foi captada a matriz de comparação entre os critérios selecionados para o estudo. Os dados obtidos nesse questionário se encontram no Apêndice G.

Com a participação de cada especialista foi possível obter os dados e estes foram inseridos no algoritmo implementado no *software* Matlab presente no Apêndice A, resultando no vetor prioridade W (1,j) presente na Equação 7.

A Tabela 14 apresenta os valores do vetor prioridade obtidos a partir da opinião dos especialistas consultados, onde cada critério está descrito na Tabela 12. O vetor prioridade traduz o peso de cada critério, em que cada linha da Tabela 14 é o peso de cada parâmetro considerado no processo de decisão.

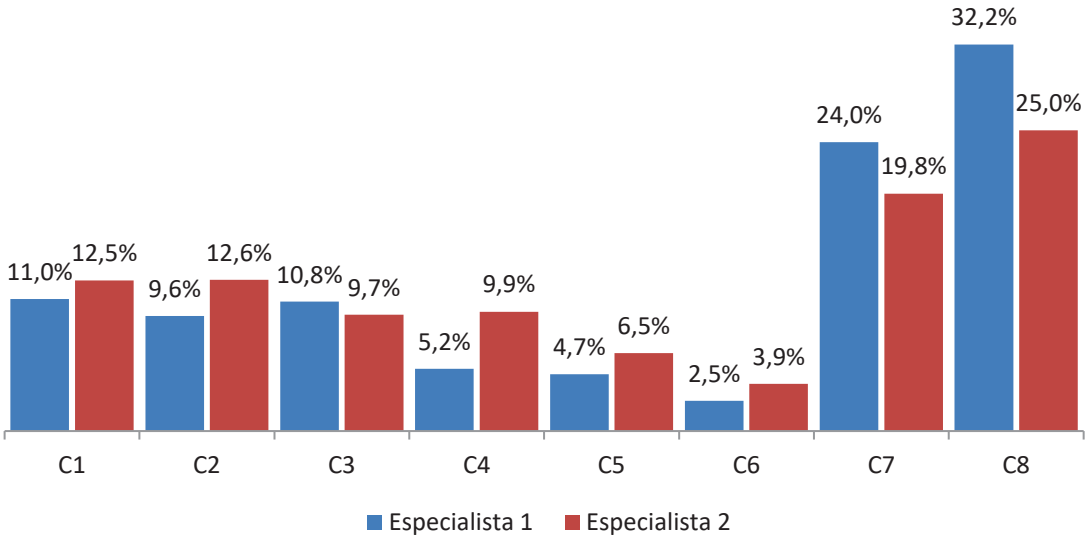
TABELA 17 - VETOR PRIORIDADE OBTIDO ATRAVÉS DA AVALIAÇÃO DOS ESPECIALISTAS

Vetor prioridade	Especialista 1	Especialista 2
C1	10,98%	12,54%
C2	9,58%	12,59%
C3	10,77%	9,69%
C4	5,19%	9,94%
C5	4,74%	6,48%
C6	2,52%	3,94%
C7	24,04%	19,77%
C8	32,18%	25,04%

FONTE: A autora (2024).

Para visualização gráfica, os dados da Tabela 14 foram expostos na Figura 7.

FIGURA 7 - PESO ESTABELECIDO POR CRITÉRIO ATRAVÉS DA AVALIAÇÃO DE ESPECIALISTAS



FONTE: A autora (2024).

Para os dois especialistas consultados, o critério considerado de maior importância para a seleção de um combustível alternativo para a caldeira foi o preço do combustível, seguido pela umidade do material. Isso demonstra alinhamento da pesquisa com o estudo de Souza (2019) e Anderson et al (2012), que selecionaram fontes energéticas alternativas para produção de bioquerosene, onde estes afirmam que o critério viabiliza o uso de um combustível complementar.

A umidade, conforme Cortez et al (2008), é o que determina o processo de conversão energético de um combustível, pois a umidade influencia diretamente no montante de energia a ser aproveitado em um combustível.

Interessante ressaltar que a ordem, de maior prioridade para menor prioridade na escolha de um combustível para o especialista 1 foi: preço do combustível, umidade, PCS, temperatura de condensação de H_2SO_4, teor de cinzas, índice de tendência à formação de incrustação, índice de tendência à formação de escória e, por fim, teor de cloro.

Para o especialista 2, a ordem foi: preço do combustível, umidade, teor de cinzas, PCS, índice de tendência à formação de incrustação, temperatura de condensação de H_2SO_4, índice de tendência à formação de escória e, por fim, teor de cloro.

Os fatores de menor prioridade também convergiram para os dois especialistas entrevistados: índice de formação de escória e teor de cloro. Acredita-se que este julgamento foi devido ao teor de cloro estar relacionado às emissões atmosféricas. No Brasil ainda não existe legislações acerca de padrões permitidos de presença de cloro em

combustíveis a serem utilizados para fins energéticos. A Comunidade Europeia está à frente, possuindo em seu acervo legislativo normas como ENplus.

Estima-se que o índice de tendência à formação de escória também foi um índice com baixa prioridade pelo motivo de estar relacionado a outros parâmetros selecionados à pesquisa, como: teor de cinzas, índice de tendência à formação de incrustação e temperatura de condensação de H_2SO_4.

6.2 RANQUEAMENTO DAS ALTERNATIVAS DE BIOMASSA

A partir dos métodos TOPSIS e MOORA foram obtidos os ranqueamentos das alternativas. O esperado é que os métodos prosperem e forneçam o mesmo ranqueamento, já que serão implementados os mesmos valores nos algoritmos.

Abaixo, na Tabela 15, estão os ranqueamentos obtidos para cada método, utilizando os pesos dos critérios para cada especialista.

TABELA 18 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO TOPSIS E MOORA

Alternativa	TOPSIS Especialista 1	TOPSIS Especialista 2	MOORA Especialista 1	MOORA Especialista 2
Cavaco de eucalipto	1	1	1	1
Lodo industrial de ETE	4	6	4	4
Bambu	5	3	5	5
Casca de soja	6	4	2	3
Bagaço de cana-de-açúcar	3	2	7	2
Resíduo de farelo de soja	7	7	3	7
Sorgo biomassa	2	5	6	6

FONTE: A autora (2024).

Através das técnicas de tomada de decisão multicritério foram obtidos ranqueamentos similares.

Primeiramente, comparando o método TOPSIS utilizando os pesos obtidos pelos dois especialistas, foi obtido o mesmo resultado para a primeira posição - melhor combustível - e a última posição - combustível não indicado pelo método – entretanto, não se obteve padrão para as demais alternativas de combustível. A primeira posição foi ocupada pelo cavaco de eucalipto, resultado interessante por se tratar do combustível mais utilizado atualmente em caldeiras industriais.

A última posição foi ocupada pelo resíduo de farelo de soja, devido ao alto custo da alternativa obtida na pesquisa de custo realizada. Considerando que, apesar de ser um resíduo, o custo de produção do farelo de soja ser alto, somente recomenda-se, segundo os resultados obtidos, a queima do combustível se não houver outra forma de utilização.

Entretanto, conforme Hochscheidt et al (2016), complementar o eucalipto com o farelo de soja pode incrementar o poder calorífico da mistura, trazendo benefícios para o sistema gerador de vapor.

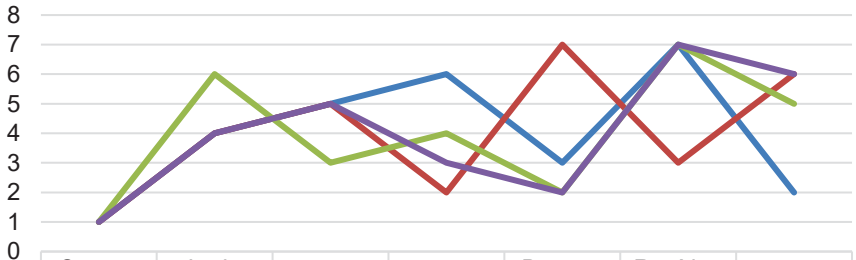
Para o método MOORA, houve sinergia entre os ranqueamentos mesmo variando o vetor de pesos dos critérios em função dos especialistas. As posições 1, 4, 5 e 6 foram iguais para ambos os especialistas.

Com maior discrepância se destaca o combustível farelo de soja, que ocupa a posição 3 para o especialista 1 e a posição 7 para o especialista 2. Atribui-se essa ocorrência ao fato do especialista 1 atribuir maior peso a umidade do combustível, e menor peso nos índices de teor de cloro, índice de tendência à formação de incrustação e escória, e maior peso ao critério temperatura de condensação do H_2SO_4, onde a alternativa farelo de soja possui segunda melhor caracterização, somente atrás do cavaco de eucalipto.

Comparando o desempenho entre diferentes métodos para o mesmo especialista, utilizando o mesmo vetor prioridade, para o especialista 1 foi obtida a mesma alternativa para as posições 1, 4 e 5. Para o especialista 2, variando entre o método TOPSIS e MOORA, foi obtido as mesmas alternativas para as posições: 1, 2 e 7.

Apesar de esperar resultados idênticos utilizando diferentes métodos, o trabalho de Martinéz (2016), também apresentou divergência entre os métodos de decisão. O autor em sua obra avaliou a aplicação de sete diferentes alternativas de biomassa para um reator do tipo Fischer Tropsch, utilizando cinco diferentes tipos de métodos de tomada de decisão, utilizando os mesmos dados para aplicação dos cinco. A Figura 8 apresenta os dados obtidos na pesquisa conforme o autor Martinéz apresenta em sua pesquisa.

FIGURA 8 - RANQUEAMENTO ENTRE COMBUSTÍVEIS PARA DIFERENTES MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO



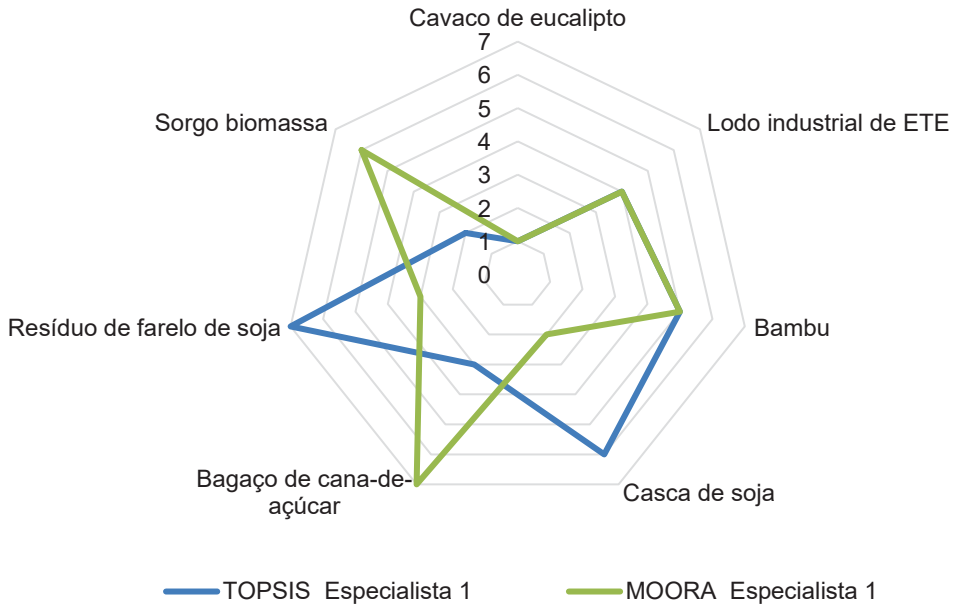
	Cavaco de eucalipto	Lodo industrial de ETE	Bambu	Casca de soja	Bagaço de cana-de-açúcar	Resíduo de farelo de soja	Sorgo biomassa
TOPSIS Especialista 1	1	4	5	6	3	7	2
MOORA Especialista 1	1	4	5	2	7	3	6
TOPSIS Especialista 2	1	6	3	4	2	7	5
MOORA Especialista 2	1	4	5	3	2	7	6

FONTE: A autora (2024).

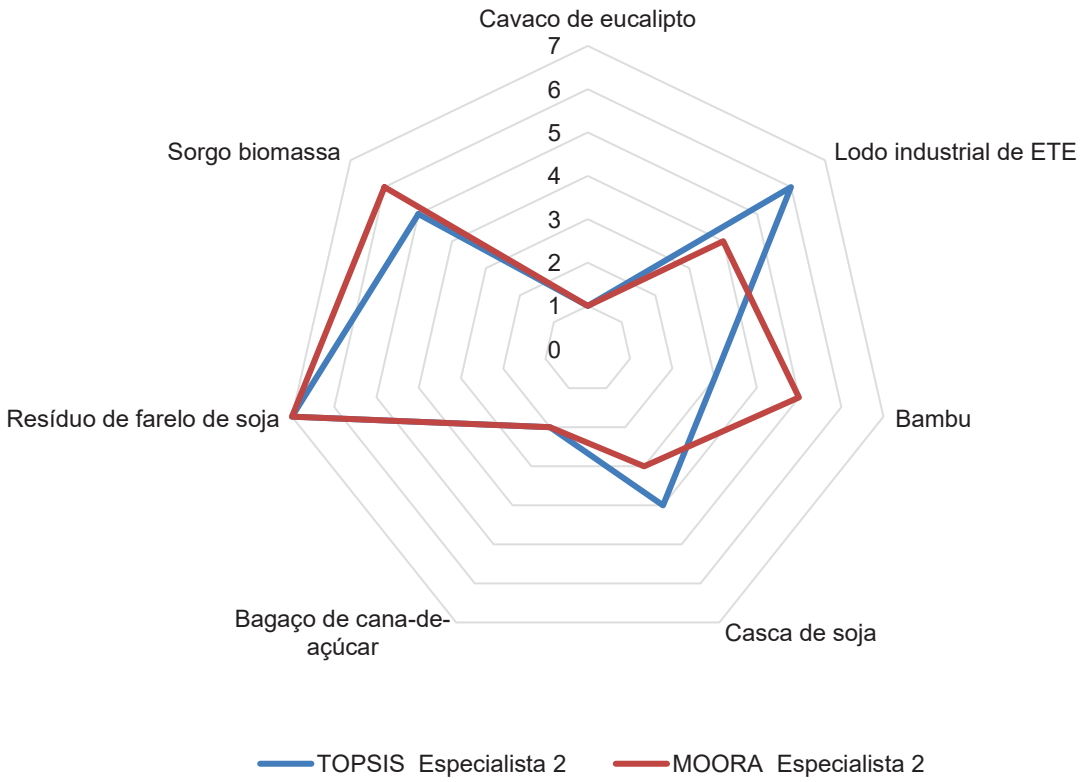
O autor Martinéz (2016) ressalta que os métodos são ferramentas importantes para reconhecer e identificar a melhor alternativa dentre opções variadas. O autor indica que o método pode se adaptar a diferentes tipos de biomassa, podendo afetar o resultado final, e indica que deve ser observado principalmente as melhores alternativas apontadas pelos diferentes métodos, sendo considerados norteadores em uma decisão importante, como a escolha de um combustível de complementação para cadeia energética de uma indústria.

O trabalho de Ullah et al. (2021) apresenta os diferentes resultados obtidos pelo seu estudo através de um gráfico radar de múltiplas dimensões, onde cada dimensão radial se refere a uma alternativa de seu estudo, e as variações no eixo y a posição do ranqueamento. Para o presente estudo, a partir dos resultados presentes na Tabela 15 foi elaborado o gráfico da Figura 9.

FIGURA 9 - GRÁFICO DE RADAR DO RANQUEAMENTO DAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE BIOMASSA SELECIONADAS



(a)



(b)

FONTE: A autora (2024).

6.3 VALIDAÇÃO DOS RANQUEAMENTOS

Com o objetivo de validação dos métodos de tomada de decisão multicritério, foi realizada a pesquisa com especialistas e técnicos para entender o processo de escolha de um combustível. A pesquisa enviada se encontra no Apêndice E e os resultados obtidos estão presentes na Tabela 16.

TABELA 19 - RANQUEAMENTO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA CALDEIRAS INDUSTRIAIS OBTIDOS ATRAVÉS DO JULGAMENTO DE TÉCNICOS E ESPECIALISTAS

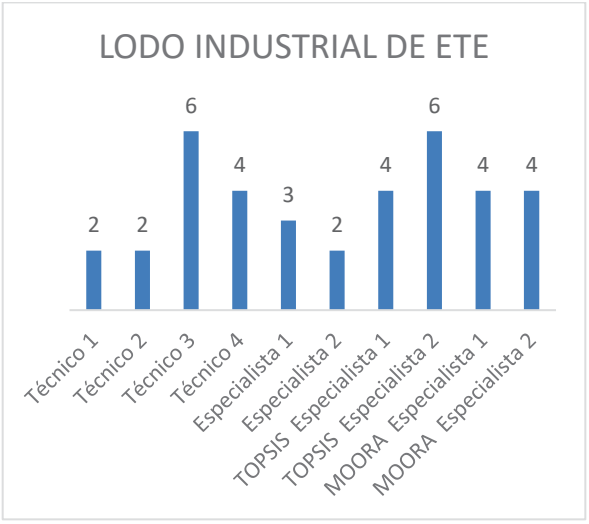
Alternativa	Técnico 1	Técnico 2	Técnico 3	Técnico 4	Especialista 1	Especialista 2
Cavaco de eucalipto	1	1	1	1	1	1
Lodo industrial de ETE	2	2	6	4	3	2
Bambu	3	5	5	5	5	4
Casca de soja	4	6	4	6	2	5
Bagaço de cana-de-açúcar	6	3	2	2	4	3
Resíduo de farelo de soja	5	7	7	7	7	7
Sorgo biomassa	7	4	3	3	6	6

FONTE: A autora (2024).

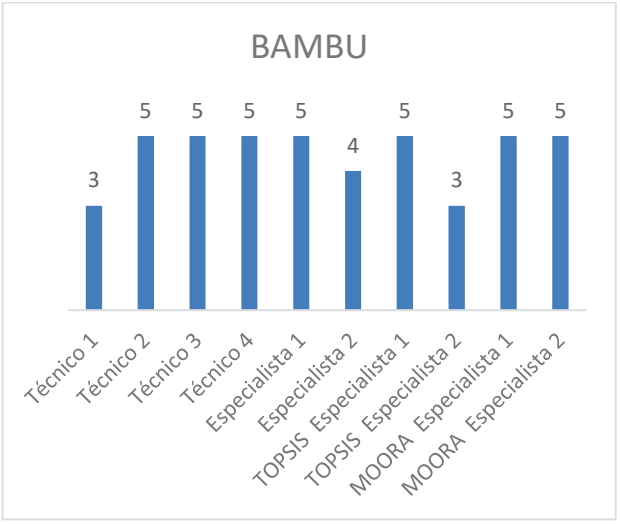
O questionário tinha o objetivo de relacionar como um técnico e um especialista escolheriam um combustível para uma unidade industrial e utilizariam em suas unidades geradoras de vapor. Os entrevistados retornaram com o ranqueamento através do julgamento técnico com as vivências adquiridas por cada um deles. Foi deixado fixada a posição 1 para o cavaco de eucalipto e não foi desvendado no questionário o nome das alternativas, para que não influenciasse na escolha do ranqueamento destas.

Abaixo na Figura 10 os gráficos de comparação de ranqueamento das alternativas avaliadas nesse estudo.

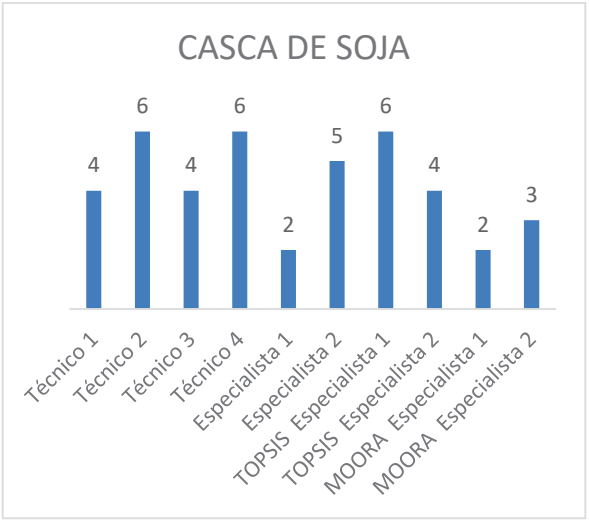
FIGURA 10 - RANQUEAMENTO OBTIDO ENTRE AS DIFERENTES METODOLOGIAS PARA CADA ALTERNATIVA ESTUDADA



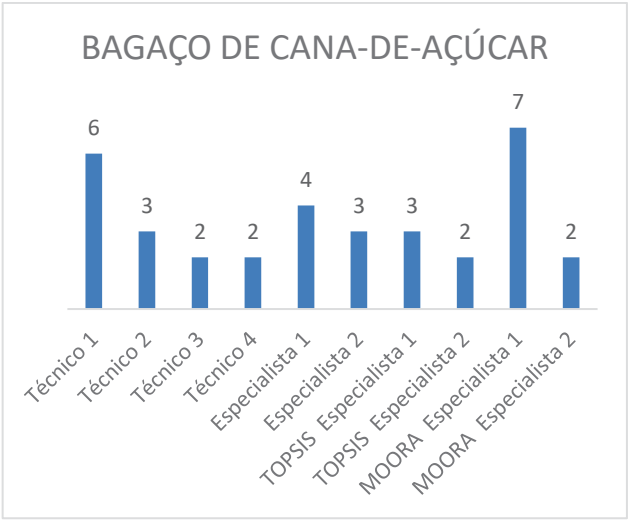
(a)



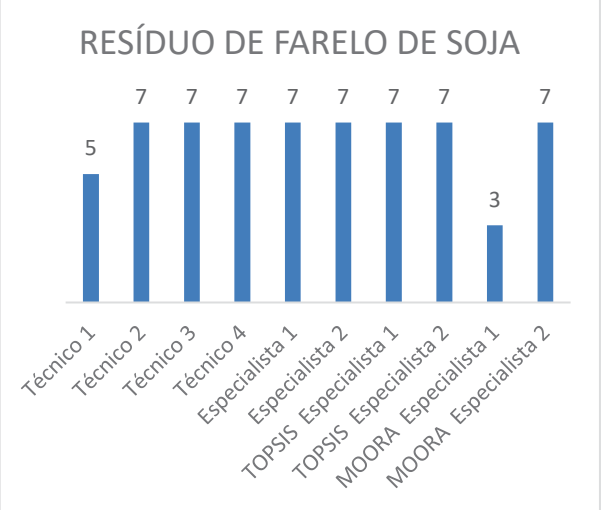
(b)



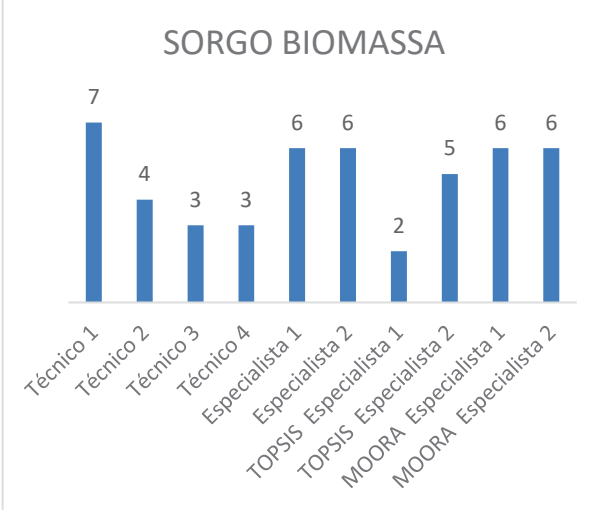
(c)



(d)



(e)



(f)

FONTE: A autora (2024).

Avaliando os ranqueamentos, os técnicos 2, 3 e 4 e os especialistas 1 e 2 foram influenciados fortemente pelo preço do combustível e pelo PCS. Acredita-se que o técnico 1 foi influenciado de forma isolada pelo PCS da alternativa.

A Tabela 16 ilustra que a opinião diverge entre os entrevistados, onde a utilização de métodos MCDM contribui com as empresas, não deixando-as reféns de decisões vulneráveis a gosto, experiências, ou até mesmo inexperiências que podem levar a julgamentos imprecisos, evitando desperdícios, paradas de processo e até mesmo redução de vida útil de equipamentos.

Entretanto, para a finalidade de validação dos métodos de decisão multicritério, algumas posições convergiram quando avaliados os métodos TOPSIS e MOORA e o ranqueamento obtido na Tabela 16, principalmente quando se trata do ranqueamento realizado pelos especialistas.

Como o caso do resíduo de farelo de soja, que obteve a última posição dos ranqueamentos obtidos através dos métodos TOPSIS (especialista 1 e 2), MOORA (especialista 2), técnicos 2, 3, 4, especialista 1 e 2. Houve variação entre a opinião do técnico 1 e do método MOORA para o vetor prioridade obtido através do especialista 1, onde atribui-se o fato devido a esta alternativa possuir um alto PCS e baixa umidade, onde os dados distinguiram pelo entrevistado atribuir maior peso a umidade e ao PCS frente o custo da alternativa.

A alternativa bambu obteve ranqueamento similar para os técnicos 2, 3, 4, especialista 1, TOPSIS (especialista 1) e MOORA (especialista 1 e 2), obtendo quinta posição.

Dentre as alternativas avaliadas não citadas acima, não houve sinergia entre os métodos de forma direta, principalmente quando avaliado o ranqueamento obtido diretamente pela opinião dos técnicos entrevistados.

6.4 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE KENDALL TAU

Foi calculado o coeficiente de correlação de Kendall Tau, o valor de t estatístico e o p valor para os métodos de decisão multicritério combinados ao ranqueamento elaborado por cada especialista, presente na Tabela 17.

TABELA 20 - COEFICIENTE DE KENDALL TAU E p VALOR DAS COMBINAÇÕES ENTRE MCDM E ESPECIALISTAS

Método	Tau de Kendall	T estatístico	P valor
TOPSIS / Especialista 1	0,17	0,78	0,23
TOPSIS / Especialista 2	0,44	2,23	0,04
MOORA / Especialista 1	0,30	1,46	0,10
MOORA / Especialista 2	0,51	2,68	0,02

FONTE: A autora (2024).

O coeficiente de correlação de Kendall Tau retorna um fator de como está a relação monotônica entre as posições do ranqueamento avaliado, e analisa a intensidade do relacionamento entre os dados. Este fator varia de -1 a 1, onde, quanto mais próximo da extremidade positiva, maior a relação entre o ranqueamento, e quanto mais próximo da extremidade negativa, menor a associação entre os resultados.

Considerando o exposto por Brossart, Laird e Armstrong (2018), somente a correlação entre o ranqueamento obtido pelo especialista 1 e o método TOPSIS não foi considerado forte. Como as outras análises resultaram em um coeficiente de Kendall Tau superior a 0,3, possuem um relacionamento positivo moderado entre os dados.

Visando determinar se o coeficiente de correlação de Kendall Tau calculado foi estatisticamente significativo, foi calculado o teste T de Student e o p valor, onde é considerado significativo as análises com o p valor inferior a 0,05 levando em consideração o nível de significância adotado.

Os testes estatísticos que obtiveram p valor inferior a 0,05, inferior ao nível de significância, foram o MOORA e TOPSIS através do ranqueamento obtido pelo especialista 2.

7 CONCLUSÃO

A partir do desenvolvimento do levantamento bibliográfico visando investigação da caracterização de biomassas alternativas, foi observada a oportunidade de abordar as biomassas que foram selecionadas nesse estudo, visando alcançar a atenção do leitor para as oportunidades: lodo industrial de estação de tratamento de efluentes, bambu, casca de soja, bagaço de cana-de-açúcar, resíduo de farelo de soja e sorgo biomassa.

Foram verificados os principais parâmetros a se avaliar na seleção de uma biomassa para fim energético, visando o bom desempenho do gerador de vapor, estabilidade de processo e garantia da vida útil dos equipamentos industriais. Os parâmetros selecionados foram: poder calorífico superior, teor de cinzas, temperatura de condensação do H_2SO_4, índice de tendência a formação de incrustação, índice de tendência a formação de escória, teor de cloro, teor de umidade e o preço do combustível.

Em seguida, foram selecionados os métodos de decisão multicritério para o desenvolvimento dos ranqueamentos, onde foram selecionados os métodos TOPSIS e MOORA, entretanto, estes dependem de entradas como os pesos dos parâmetros avaliados. Com o objetivo de não atribuir personalidade ao estudo, os pesos foram obtidos através do vetor prioridade obtido pelo método AHP.

Foram convidados dois especialistas do ramo de projetos de caldeiras, que possuem a atribuição de desenvolver caldeiras para diferentes segmentos industriais. Após definidos os métodos, foram desenvolvidos os algoritmos para os métodos TOPSIS, MOORA e AHP através do *software* Matlab.

O método AHP recomenda que especialistas realizem os julgamentos par a par entre os critérios para obter a influência em que cada um tem no processo de decisão.

Com estes dados, foi possível obter, através da opinião de especialistas, o peso de cada critério avaliado nesta pesquisa durante o processo de decisão de qual biomassa escolher.

Foi implementado o algoritmo para cada vetor prioridade obtido, onde o observado foi que os ranqueamentos convergiram em partes, porém, principalmente a primeira e a última posição, sendo adequado para indicar qual combustível seria ideal e não ideal testar em uma unidade industrial visando as condições de peso e critérios selecionados neste estudo.

Evidencia-se nos quatro testes com MCDM que o cavaco de eucalipto ocupou a primeira posição, resultado interessante, visto que o cavaco de eucalipto é o combustível convencional de unidades geradoras de vapor industriais.

Após, foi elaborado questionário para entrevistar técnicos e especialistas visando validar os ranqueamentos obtidos através dos MCDM. Foram entrevistados quatro técnicos

e os dois especialistas. Para não influenciar a escolha, foi ocultado o nome das alternativas de combustível e fixado na primeira posição do ranqueamento o cavaco de eucalipto, por se tratar da opção convencional de mercado.

A Figura 10 compara os ranqueamentos obtidos por cada alternativa. O cavaco de eucalipto obteve primeira colocação em todos os testes, onde os métodos indicam que as alternativas com potencial para utilização seria a casca de soja e o bagaço de cana-de-açúcar.

No entanto, a variabilidade dos resultados aumentou quando avaliado isoladamente os resultados obtidos no questionário presente no Apêndice E. Isso se deve a escolha feita por um indivíduo ser influenciada por vários fatores sociais e culturais, como: diferentes vivências, preferência, empirismo, disponibilidade de tempo para avaliar as diferentes características de biomassa.

Buscando avaliar a significância estatística dos ranqueamentos obtidos através dos especialistas via questionário e os métodos de decisão multicritério, foi calculado o coeficiente de correlação de Kendall Tau e o p valor. Através do cálculo, foi possível observar que o método com menor p-valor foi o MOORA.

Dessa forma, este trabalho visou contribuir com indústrias que demandam biomassa para fins energéticos. Espera-se que com este trabalho, a escolha de biomassas alternativas seja precisa e padronizada, com convicção que a complementação do cavaco de eucalipto será positiva desde que realizada com cautela, destacando com este trabalho que os parâmetros avaliados são de extrema importância, sendo necessária sua avaliação na implementação de novas fontes energéticas.

8 TRABALHOS FUTUROS

A partir da execução deste trabalho foi percebido algumas possibilidades de trabalhos futuros que não foram abordados neste trabalho, a seguir listados:

- Configuração de sistema especialista que mapeia o conhecimento de especialistas e regras de decisão utilizando inteligência artificial;
- Concepção de árvore de decisão para alternativa ideal;
- Coletar quantidade maior de dados para algoritmos de regressão para inferir ranqueamento;
- Incluir os parâmetros incremento médio anual de cada biomassa cultivável e o deslocamento médio até os clientes na matriz de decisão.
- LTR (Learning to Rank): Utilizar vetor de prioridades de cada especialista e cada técnico para construir um modelo global de ranqueamento;
- Empregar método de ranqueamento quantitativo (Escala de Resposta) aplicando modelos MTR (Multiple Target Regression)

REFERÊNCIAS

ABASSI, M. El. *The combination of Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) and morphometric parameters for prioritizing the erodibility of sub-watersheds in the Ouljet Es Soltane basin (North of Morocco).* ***Helyon*****,** v. 10, 2024.

ALMEIDA, E. C. S. **Agroindústrias**: a indústria motriz que desenvolve a região oeste do Paraná. 2020. 115 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas e Desenvolvimento, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). ***ASME PTC 4****: Fired Steam Generators*, 2013.

ANDERSON, S., *et al*. *Aviation renewable fuels: technical status and challenges for commercialisation*. ***The Aeronautical Journal***, v. 116, n. 1185, p. 1103-1122, 2012.

ARANTES, D. C. **Bagaço de cana-de-açúcar**: análise térmica e energética de biomassa. 75 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

ARAÚJO, D. M. de. **Estudo do comportamento da co-combustão da borra de café e do bagaço de cana-de-açúcar**. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

ARRUDA, M. Z. **Análise de combustíveis de caldeiras**. 73 f. Trabalho Acadêmico (TCC) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14929**: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEINA ANIMAL (ABPA). **Relatório anual 2021**. 2020. Disponível em: <https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2022/05/Relatorio-Anual-ABPA-2022-1.pdf>. Acesso em: 12 jun 2022.

ASSUNÇÃO, J. V. de; PESQUERO, C. R. Dioxinas e furanos: origens e riscos. **Revista de Saúde Pública**. São Paulo, v. 33, n. 5, p. 523-530, 1999.

BAGGIO, R. W. O. **Modelagem de uma Caldeira Flamotubular com fornalha aquatubular**. 2018, 82 f. TCC (Graduação) – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2018.

BARBOSA, B. H.; SANTOS, C. S. dos; OLIVEIRA, S. de. Análise da eficiência energética do bagaço da cana na geração de vapor em uma usina sucroalcooleira. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, São Paulo, v. 8, n. 3, p. 106-121, Set./Dez. 2018.

BAZZO, E. **Geração de Vapor**. 2.ed. rev. ampl. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.

BELL, R. A. de O. **Demanda de lenha para secagem de grãos no estado do Paraná**. 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BHOJANE, M. S. MURMU, S. C. CHATTOPADHYAY, H. DUTTA, A. *Application of MCDM technique for selection of fuel in power plant.* ***Materials today:*** *proceedings.*

BOUMANCHAR, I.; CHHITI, Y.; ALOUI, F. E. M.; OUINANI, A. E.; DINE, A. S.; BENTISS, F.; JAMA, C.; BENSITEL, M. *Effect of materials mixture on the higher heating value: Case of biomass, biochar and municipal solid waste.* ***Waste Management***, v. 61, p. 78-86, 2016.

BRANDÃO, Y. F. F.; VASCONSELOS, W. E. de; SALES, I. T. Estudo de caso da matriz elétrica brasileira: escolha de fontes não emissoras de co2com auxílio do método ahp. ***Brazilian Journal of Production Engineering***. São Mateus, v. 8, n. 3, p. 01-11, 2022.

BRASIL, A. C. M.; GHESTI, G. F.; RODRIGUES, J. P.; GUIMARÃES, M. G.; EVARISTO, R. B. W. **Caracterização e aplicação de biomassa em tecnologias de conversão termoquímica**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2021. 116p.

BRAUERS, W. K. M.; ZAVADSKAS, E. K. *The MOORA method and its application to privatization in a transition economy*. ***Control and Cybernetics***, v. 35, n. 2, p. 445-469, 2006.

BRAUERS, W. K. M.; ZAVADSKAS, E. K. *Multi-objective optimization with discrete alternatives on the basis of ratio analysis*. ***Intellectual Economics***, v. 6, n. 2, p. 30-41, 2009.

BRAUERS, W. K. M.; ZAVADSKAS, E. K.; PELDSCHUS, F.; TURSKIS, Z. *Multi-objective decision-making for road design.* ***Transport***. V. 23, n.3, p. 183-193, 2008.

BROSSART, D. F.; LAIRD, V. C.; ARMSTRONG, T. W. *Interpreting Kendall's Tau and Tau-U for single-case experimental designs*. **Cogent Psychology**, v. 5, p.1-26.

BRYERS, R. W. ***Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat transfer surface due to impurities in steam-raising fuels****. Progress In Energy and Combustion Science*, [S.L.], v. 22, n. 1, p. 29-120, jan. 1996.

CÂNDIDO, W. L. **Redução de cloreto em partículas de madeira de eucalipto para a produção de pellets**. 2019. 42 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

CARVALHO, N.R.; BARROS, J. L. de; SILVA, D. A. da; NAKASHIMA, G. T.; YAMAJI, F. N. Caracterização física e química da biomassa usada como combustível sólido em uma caldeira. **Química Nova**, São Paulo, v. 44, n. 1, p. 35-40, 2021.

CHAI, N.; ZHOU, W. *A novel hybrid MCDM approach for selecting sustainable alternative aviation fuels in supply chain management*. ***Fuel***, China, v. 327, art. 125180, 2022.

CHAVES, M. C. de C.; GOMES, C. F. S. Avaliação de biocombustíveis utilizando o apoio multicritério à decisão. ***Production***, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, p. 495-507, jul./set. 2014.

COELHO, L. dos S.; MARTINS, F. G. Aplicação do método de análise hierárquica do processo para o planejamento de ordens de manutenção em dutovias. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**. V. 7, nº 1, p. 65-80, 2011.

CORRADI, G. M.; HOLLER, W. A.; MOREIRA, J. M. M. A. P.; GOMES, J. B. V.; OLIVEIRA, E. B. de. **Oferta e demanda de madeira para energia térmica na região oeste paranaense**. Colombo: EMBRAPA, 2021. Documento técnico.

CORRADI, G. M. **Qualidade energética de diferentes biomassas florestais utilizadas no oeste paranaense**. 2021. 32 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2021.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. 740 p.

COSTA NETO, P. L. de O. **Estatística**. 2. Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2002.

DEBONI, T, L. **Qualidade da biomassa florestal utilizada para geração de energia por uma unidade cogeradora em Lages-SC**. 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2017.

DURAIRAJ, S.; SEKAR, K. S.; ILANGKUMARAN, M.; RAMMANOHAR, M.; THYALAN, B.; YUVARAJ, E.; RAMESH, S. *Multi-criteria decision model for biodiesel selection in an electrical power generator based on fahp-gratopsis.* ***International Journal of Research in Engineering and Technology***. V. 3, n. 11, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2022**. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 02 ago 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2023**. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024 >. Acesso em: 30 jul 2024.

ESCOBAR, J. F. **A produção sustentável de biomassa florestal para energia no Brasil**: o caso dos pellets de madeira. 122 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

FAGNANI, Kátia Cristina. **Comparação do potencial energético do lodo gerado no tratamento físico-químico de efluentes provenientes do abate de aves utilizando diferentes coagulantes**. 2017. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Tecnologia em Bioprodutos Agroindustriais, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2017.

FOELKEL, C. E. B. **Eucalipto no Brasil, história de pioneirismo**. Disponível em: < https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/va04-florestas-plantadas03.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2024.

FRANCISCO, R. P. **Estudo termoquímico da queima de combustíveis em caldeiras usando balanços de energia**. 2012. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de São João Del Rey, Minas Gerais, 2012.

GADAKH, V.S.; SHINDE, V.B.; KHEMNAR, N.S. *Optimization of welding process parameters using MOORA method*. ***The International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, v. 69, 2020.

GALDINO, M. A. E.; LIMA, J. H.; RIBEIRO, C. M.; EDUARDO, T. S. **O contexto das energias renováveis no Brasil**. Revista da Direng, p.17-25, 2000.

GANAPATHY, V. *Cold end corrosion: causes and cures*. ***Hydrocarbon Processing****.* Texas, p. 57-59, 1989.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. 1. Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIROTTO, A. T. Secagem de lodos de efluentes industriais para queima na caldeira como biomassa na geração de energia e redução de custos com a destinação dos resíduos. **Anais de Engenharia de Produção - Uceff**, Chapecó, v. 2, n. 1, p. 175-190, jan. 2018.

GODINHO, J. M.; MIRANDA, L. M. Aplicação de método de análise multicritério na escolha de traçado de linhas de ônibus de transporte público utilizando sistema de informação geográfica. ***E&S - Engineering and Science***, Cuiabá, v. 1, n. 1, p. 1-13, 2014.

GUARNETTI, R. L. **Cogeração de eletricidade utilizando bambu no Brasil**: aspectos técnicos, econômicos e ambientais. 2013. 156 f. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

GUIMARÃES JR., M.; NOVACK, K. M.; BOTARO, V. R. Caracterização anatômica da fibra de bambu (*bambusa vulgaris*) visando sua utilização em compósitos poliméricos. **Revista Íberoamericana de Polímeros**, v. 11, n. 7, p. 442 – 456, 2010.

HAJKOWICZ, S.; COLLINS, K. *A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management.* ***Water Resour Manage***, p. 1553–1566, 2007.

HENNE, R. A. **Caracterização da formação e da composição das cinzas e dos problemas associados à combustão da biomassa florestal em caldeira**. 2018. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2018.

HOCHSCHEIDT, B.; PIETA, F. da S.; BAVARESCO, A.; OLIVEIRA, A. F. da. Análise das características químicas e energéticas de blendas de farelo de soja com bagaço de cana e serragem de eucalipto*.* ***Acta Iguazu***, v. 5, n.1, p. 01-09, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **PAM**: Produção Agrícola Municipal. 2024. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 26 out. 2024.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Ibá 2020**. p. 66, 2020.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). **Paranaense: o 3º espaço relevante: especificidades e diversidades**. Curitiba: IPARDES, 2008.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). ***Air Pollution and Cancer***. Lyon: [S.N.], p. 161, 2013.

ISHIZAKA, A.; LABIB, A. *Review of the main developments in the analytic hierarchy process.* ***Expert systems with applications***. V. 38, n. 11, p. 14336-14345, 2011.

KUSUNOKI, M. *Mono-manganese mechanism of the photosytem II water splitting reaction by a unique Mn4Ca cluster*. ***Biochimica et Biophysica Acta (BBA)- Bioenergetics****,* Japão, v. 1767, n. 6, p. 484-492, 2007.

LI, Y.; ZHANG, X.; ZHAO, J.; HUANG, Y.; WANG, Z.; YI, Y. *Distribution of geothermal resources in Eryuan County based on entropy weight TOPSIS and AHP–TOPSIS methods*. ***Natural Gas Industry B***, China, v. 11, p. 213-226, 2024.

LIMA, L. G. P. R. **Melhoria na eficiência térmica de uma caldeira aquatubular alimentada a cavaco florestal**. 58 f. TCC (Graduação) – Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.

LORA E. E. S.; NOGUEIRA L. A. H. **Dendroenergia**: fundamentos e aplicações. 2ª edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

MANTOVAN, F. de M. **Estudo da queima de lodo flotado de estação de tratamento de efluentes em caldeira a biomassa**. 2021. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2021.

MANTOVAN, F. de M.; TELEKEN, J.G.; OLIVEIRA, A. F. de; BURIN, E. L. K.; BAZZO, E. *Co-combustion of floated sludge from a slaughterhouse wasterwater treatment plant with eucalyptus woodchips in a biomass steam generator*. *In*: *Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, 19 ed., 2022, Bento Gonçalves. **Artigo**. Bento Gonçalves: ENCIT, 2022.

MARAFON, A. C.; SANTIAGO, A. D.; AMARAL, A. F. C.; BIERHALS, A. N.; PAIVA, H. L.; GUIMARÃES, V. dos S. **Uso da biomassa para geração de energia**. Aracaju: EMBRAPA, 2016. Documento técnico.

MARAVER, A. G.; SANCHEZ, J. M.; CARPIO, M.; JIMENEZ, J. A. P. *Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency.* ***Journal of the Energy Institute***. V. 90, p. 214-228. 2017.

MARTINÉZ, J. G. *Use of multicriteria decision making methods for biomass selection in Fischer Tropsch reactors*. ***Revista de Ciencia y Tecnologia***, Equador, n. 15, p 27-36, 2016.

MAY, A.; PARRELLA, R. A. da C.; PARRELLA, N. N. L. D.; SCHAFFERT, R. E.; CASTRO, L. H. S.; ASSIS, R. T. de. **Sorgo Biomassa para a Cogeração de Energia**. Sete Lagoas: EMBRAPA, 2015. Documento técnico.

MELO, W.J., MARQUES, M.O.; MELO, V.P. O uso agrícola do biossólido e a suas propriedades do solo. In: **Biossólido na agricultura**. Cap. 12. Sabesp, Escola Politécnica – USP, ESALQ-USP/Nupegel, UNESP – Jaboticabal. São Paulo, 2001.

MENEGHINI, C.; PROINELLI, R. F. Análise de viabilidade da queima de lodo frigorífico em uma caldeira à lenha. **Unoesc e Ciência - Acet**, Joaçaba, v. , n. , p. 7-14, maio 2015.

METCALF, L.; EDDY, H. P. ***Wastewater Engineering****: Treatment and reuse*. 4 ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2003.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **NR 13**: NR-13 Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento. Brasília: Secretaria de Saúde e Segurança do Trabalho, 2018.

MIRANDA, M. A. S.; RIBEIRO, G. B. D.; VALVERDE, S. R.; ISBAEX, C. *Eucalyptus sp. woodchip potential for industrial thermal energy production*. **Revista Árvore**, v. 41, n. 6, 2017.

MONTIS, A. de; TORO, P. de; FRANKE, B. D.; OMANN, I.; STAGL, S. *Criteria for quality assessment of MCDA methods*. *In: Biennial Conference of the European Society for Ecological Economics*, 3., *Vienna*, ***Proceedings***. 2000.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da Madeira**. Apostila didática FUPEF, 4ª ed., Curitiba: FUPEF, 2005.

MUNIR, S. *Potential slagging and fouling problems associated with biomass-coal blends in coal-fired boilers*. ***Journal Of The Pakistan Institute Of Chemical Engineers***. [S.L.], p. 1-11. fev. 2010.

NAKAI, D. K.; MAY, A.; SILVA, M. A. da; PARRELLA, R. A. da C. **Uso do sorgo biomassa em caldeiras de combustão**: cuidados, precauções e fatores relacionados à qualidade da matéria-prima. Sete Lagoas: EMBRAPA, 2016. Documento técnico.

NATIONAL ATMOSPHERIC EMISSIONS INVENTORY (NAEI). ***Overview of air pollutants***. 2016. Disponível em: https://naei.beis.gov.uk/overview/ap-overview. Acesso em: 20 nov. 2023.

OLANREWAJU, F. O.; ANDREWS, G. E.; LI, H. PHYLAKTOU, H. N.; MUSTAFA, B. G.; KIAH, M. H. M. *Investigation of the heat release rate and particle generation during fixed bed gasification of sweet sorghum stalk.* ***Fuel***. v. 332, 2023.

OLIVEIRA, N. A. B. de. **O uso do sorgo biomassa para cogeração**: aspectos técnicos e econômicos. 94 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2016.

OLIVEIRA, T. J. P. de. **Caracterização anatômica da fibra de bambu (bambusa vulgaris) visando sua utilização em compósitos poliméricos**. 181 f. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

OMASHI, I. H.; RODRIGUES, L. G.; STOLF, M.; CANNAVAL, R.; SOBREIRO, R. **Produção de biomassa florestal para exportação:** o caso da Amcel. Biomassa & Energia, v. 1, n. 1, p. 29-36, 2004.

OSBORN, T. W. *Elemental Composition of Soybean Meal and Interlaboratory Performance.* ***J. Agric. Food Chem***., v. 25, n. 2, 1977.

OYAMA, H. C. **Análise de processo em caldeiras da indústria sucroenergética**. 91 f. Monografia (Graduação) – Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

PAULA, L. E. de R. e; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. *Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation*. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, abr./jun. 2011.

PEREIRA, N. B. S. **Análise do cavaco de bambu como alternativa ao cavaco de eucalipto para utilização em caldeiras a vapor**. 58 f. TCC (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

PEREIRA, T. V.; SEYE O. **Caracterização física térmica de biomassa local**. 2014. ENEPEX, UFGD/UEMS.

PUTUN, A. E.; APAYDIN, E.; PUTUN, E. *Bio-oil production from pyrolysis and steam pyrolysis of soybean-cake: product yields and composition*. ***Energy***. v. 27, p. 703-713, 2002.

QUEIROZ, M. B.; FERREIRA, M. M. C.; RAMBO, M. K. D. Correlação entre o poder calorífico e a composição química de biomassas lignocelulósicas. *In*: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 37 ed., 2014, Natal, **Resumo**.

RAJU, S. S.; MURALI, G. B.; PATNAIK, P. K. *Ranking of Al-CSA composite by MCDM approach using AHP–TOPSIS and MOORA methods*. ***Journal of reinforced plastics and composites***, p. 1-12, 2020.

RETSCHITZEGGER, S.; BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I. *Low-temperature corrosion in biomass boilers fired with chemically untreated wood chips and bark*. ***Energy and Fuels***, v. 29, 2015.

RIBEIRO, A. P. R. A. **influência da qualidade do carvão e das condições operacionais no processo de combustão de uma usina termelétrica**. Dissertação (Mestrado), UFSC, Florianópolis, 2002.

ROWELL, R. M.; PETERSSEN, R.; HAN, J.S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. ***Cell Wall Chemistry***. In: Rowell, R. M. *Handbook of Wood Chemistry and wood composities. CRC Press*, 2005.

SANTAROSA, E.; PENTEADO JUNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. dos R. **Transferência de tecnologia florestal**: cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda. Brasília: EMBRAPA, 2021.

SARKODIE, W. O. OFOSU, E. A. AMPIMAH, B. C*. Decision optimization techniques for evaluating renewable energy resources for power generation in Ghana: MCDMapproach.* ***Energy Reports***.v. 8, p. 13504-13513. 2022.

SARTORI, W. W.; SILVA, A. L. da; TARDIN, F. D.; SILVA, V. Q. R. da; SANTOS, C. V. dos; ROTTA, G. W.; CARDOSO, W. R.; CARDOSO, W. S.; MORALES, M. M. Geração de energia a partir de sorgo biomassa e capim elefante com adição de óleos residuais. **Inteletto**. v. 2, n. 1, p. 112-116, 2016.

SAATY T. L. ***The Analytic Hierarchy Process***. New York: McGraw Hill International, 1980.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. ***Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process***. 2. ed. Califórnia: *Springer New York Heidelberg Dorbrecht London*, 2012.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS, GOVERNO DO PARANÁ (SEMA). **Resolução n° 16/14**. Padrões de Emissão Atmosférica para Fontes Estacionárias, 2014.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS, GOVERNO DO PARANÁ (SEMA). **Resolução n° 42/08**. Estabelece critérios para a queima de resíduos em caldeiras e dá outras providências, 2008.

SENA, R. F. de; CLAUDINO, A.; MORETTI, K.; BONFANTI, Í. C.P.; MOREIRA, R. F.P.M.; JOSÉ, H. J. *Biofuel application of biomass obtained from a meat industry wastewater plant through the flotation process - A case study.* ***Resources, Conservation and Recycling****,* [S.L.], v. 52, n. 3, p. 557-569, jan. 2008.

SILVA, L. R. S.; FINZER, J. R. D.; BEGNINI, M.L. Cálculo da relação ar/combustível e a eficiência em caldeira alimentada com bagaço de cana-de-açúcar. *In*: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2018, São Paulo.

SILVÉRIO, P. C. **Níveis de cloreto presentes no sorgo biomassa em função de fontes de adubação potássica e épocas de colheita**. 2016. 47f. Dissertação (Mestrado). Universidade do Sagrado Coração, São Paulo, 2016.

SIMADON, K. G. **Monitoramento de sistema de lodos ativados em efluente industrial por meio de análise microscópica relacionada a parâmetros operacionais**. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Biotecnologia, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2021.

SINDIAVIPAR. **Anuário paranaense da avicultura 2022**. Disponível em: <https://flowpaper.com/online-pdf-viewer/?theme=dark&pdf=https://sindiavipar.com.br/wp-content/uploads/2022/05/Anu%C3%A1rio-Paranaense-da-Avicultura-2022.pdf&wp-hosted=1&title=&header=&singlepage=auto&thumbs=1&modified=220513837>. Acesso em: 12 jun 2022.

SIVALINGAM, C.; SUBRAMANIAM, S. K. *Cobot selection using hybrid AHP-TOPSIS based multi-criteria decision making technique for fuel filter assembly process.* ***Helyon***, v. 10, fev. 2024.

SOUZA, L. M. de. **O mercado brasileiro de bioquerosene de aviação**: mapeamento multicritério para seleção de oleaginosas para o processo HEFA. 208 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SWATHI, B.; VIDJEAPRIYA, R. *A multi-criterial optimization of low-carbon binders for a sustainable high-strength concrete using TOPSIS*. ***Construction and Building Materials***. India, v. 425, 2024.

ULLAH, Z.; ELKADEEM, M. R.; KOTB, K. M.; TAHA, I. B. M.; WANG, S. *Multi-criteria decision-making model for optimal planning of on/off grid hybrid solar, wind, hydro, biomass clean electricity supply.* ***Renowable Energy***. V. 179, p. 885-910, 2021.

UTAMA, D. M.; ASROFI, M. S.; AMALLYNDA, I. *Integration of AHP-MOORA algorithm in green supplier selection in the indonesian textile industry.* ***Journal of Physics***. V. 1933, 2020.

VALE, A. T. do; MOREIRA, A. C. de O.; MARTINS, I. S. Avaliação do potencial energético de bambusa vulgaris em função da idade. **Floresta e Ambiente**. V. 24, 2017.

VAZ JUNIOR, S.; SOARES, I. P. **Química analítica aplicada à agroenergia**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012. 97 p.

VASSILIEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, K. K.; VASSILEVA, C. G. *An overview of the chemical composition of biomass.* ***Fuel***, Amsterdam, v. 89, n. 5, p. 913-933, 2010.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

VILELA, M. H. S. B. **Integração dos métodos**: multicritério para tomada de decisão e sistema de informação geográfica para seleção de locais. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

VIRMOND, E. **Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia**. 2007. 137 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E. U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. *Combustion of agricultural residues.* ***Progress in Energy and Combustion Science***. V. 26, p. 1-27, 2000.

WINEGARTNER, E. C.. ***Coal fouling and slagging parameters****: prepared by the asme research committee in corrosion and deposits from combustion gases*. [S.L.]: [S.N.], 1974.

YIN, C.; ROSENDAHL, L. A.; KÆR, S. K.. *Grate-firing of biomass for heat and power production.* ***Progress In Energy and Combustion Science***, [S.L.], v. 34, n. 6, p. 725-754, dez. 2008.

ZANATTA, E. R. **Estudo cinético da pirólise das biomassas: bagaço de mandioca, casca de soja e bagaço de cana**. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2012.

APÊNDICE A

```
% Defina a matriz de comparação par a par (matriz exemplo)
A = [1.00    4.00    7.00    8.00    6.00    7.00    0.33    0.50
     0.25    1.00    6.00    3.00    2.00    7.00    0.20    0.25
     0.14    0.17    1.00    7.00    4.00    5.00    0.50    0.33
     0.13    0.33    0.14    1.00    3.00    7.00    0.13    0.20
     0.17    0.50    0.25    0.33    1.00    7.00    0.17    0.13
     0.14    0.14    0.20    0.14    0.14    1.00    0.20    0.33
     3.00    5.00    2.00    8.00    6.00    5.00    1.00    0.50
     2.00    4.00    3.00    5.00    8.00    3.00    2.00    1.00];
% Número de critérios
n = size(A, 1)

% Calcule a soma de cada coluna
col_soma = sum(A)

% Normalize a matriz
Anorm = A ./ col_soma

% % Calcule o vetor prioridade pela média das linhas
vetor_prioridade = mean(Anorm, 2)
%
% % Calcule a matriz de soma ponderada
Matriz_soma_ponderada = A * vetor_prioridade

% % Calcule lambda max

lambda_max = mean(Matriz_soma_ponderada./ vetor_prioridade)
%
% % % Calcule o índice de consistência (CI)
 CI = (lambda_max - n) / (n - 1)
% %
% % % Valores de Índice randômico (RI) para diferentes tamanhos de matrizes
RI_valores = [0, 0, 0.58, 0.9, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45, 1.49] % Para n=1 to 10
% %
% % % Calcule a Razão de Consistência (CR)
CR = CI / RI_valores(n)
%
%
% % Cheque se a razão de consistência é aceitável (CR < 0.1)
 if CR < 0.1
    disp('A matriz de comparação par a par é consistente.');
  else
      disp('A matriz de comparação par a par não é consistente, considere rever os
julgamentos.');
  end
```

APÊNCIDE B

Análise multicritério para seleção de alternativas de biomassas

O objetivo desta pesquisa é obter a matriz de comparação de critérios para seleção de alternativas de biomassas, através de julgamentos de especialistas.

Para alcançar o objetivo do estudo, é necessário o apoio de especialistas.

Sou Letícia, discente do programa de mestrado em Bioenergia da Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina. Estou desenvolvendo minha pesquisa com o objetivo de utilizar técnicas para tomada de decisão para seleção de combustíveis alternativos como fonte de energia renovável para caldeiras em agroindústrias localizadas no oeste paranaense. Estou imensamente grata por poder contar com seu apoio para o desenvolvimento deste estudo.

O objetivo deste questionário é obter, através da opinião de especialistas, a matriz de comparação paritária de critérios que influenciam a escolha de um combustível alternativo para uso em caldeiras industriais.

Será utilizado o método AHP para calcular o peso de cada critério avaliado nesta pesquisa (PCS, teor de cinzas, temperatura de condensação de H2SO4, índice de formação de incrustação, índice de formação de escória, teor de cloro presente na biomassa, umidade e preço). Ou seja, o método atribui o quanto cada parâmetro irá afetar a decisão final do problema.

O método AHP foi desenvolvido por Saaty em 1980, é um método numérico que considera a opinião de especialistas, que devem realizar julgamentos par a par para obter o peso da influência de cada critério sobre a decisão de uma alternativa (SOUZA, 2019).

Para contribuir com a pesquisa, o especialista convidado deverá utilizar a escala elementar desenvolvida por Saaty para realizar os julgamentos par a par, atribuindo uma intensidade, conforme descrito abaixo, referenciando como cada parâmetro influencia os outros.

Onde:

1 - Igual Importância, duas propriedades contribuem igualmente para o escolha do combustível;

3 - Importância moderada, experiência e julgamento favorecem uma propriedade sobre a outra;

5 - Importância essencial/forte, experiência e julgamento favorecem fortemente uma propriedade sobre a outra;

7 - Importância muito forte, uma propriedade é fortemente favorecida e sua dominância é demonstrada na prática;

9 - Extrema importância, a evidência favorecendo uma propriedade sobre a outra é a de maior ordem de afirmação possível;

2,4,6,8 - Valores intermediários entre dois julgamentos, quando ponderação é necessária entre os julgamentos.

Importante! Você não poderá atribuir a mesma intensidade para dois diferentes critérios em uma mesma pergunta.Abaixo uma breve explicação de cada critério.

PCS: Poder calorífico superior expresso em MJ/kg de matéria seca;
Teor de cinzas: expresso em %, demonstra a quantidade de material inerte no combustível;
Temperatura de condensação de H2SO4: expresso em graus Celsius, expressa a temperatura onde iniciam as condensações de H2SO4, gás corrosivo que pode deteriorar as estruturas da caldeira;
B/A: índice adimensional que expressa a tendência de formação de incrustação que um combustível possui, determinado através da composição elementar da fração inerte do combustível;
R: índice adimensional que expressa a tendência a formação de escória que o combustível possui, relacionado ao índice B/A e a presença de enxofre na composição elementar;
Teor de cloro: expresso em %, está relacionado a formação de gases tóxicos (dioxinas e furanos) bem como processos corrosivos em regiões de altas temperaturas;
Umidade: expresso em %, demonstra a quantidade de umidade do combustível;
Preço: expresso em custo por tonelada (R$/ton) e (R$/kcal).

1. Na sua opinião, o critério PCS (poder calorífico superior) possui qual relevância com relação aos seguintes parâmetros:

	Teor de cinzas	Temperatura de condensação de H_2SO_4	Índice de formação de incrustação	Índice de formação de escória	Teor de cloro	Umidade	Preço
1	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯
2	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯
3	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯
4	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯
5	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯
6	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯
7	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯
8	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯
9	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯

2. Na sua opinião, o critério teor de cinzas possui qual relevância com relação aos seguintes parâmetros:

	Temperatura de condensação de H2SO4	Índice de formação de incrustação	Índice de formação de escória	Teor de cloro	Umidade	Preço
1	◯	◯	◯	◯	◯	◯
2	◯	◯	◯	◯	◯	◯
3	◯	◯	◯	◯	◯	◯
4	◯	◯	◯	◯	◯	◯
5	◯	◯	◯	◯	◯	◯
6	◯	◯	◯	◯	◯	◯
7	◯	◯	◯	◯	◯	◯
8	◯	◯	◯	◯	◯	◯
9	◯	◯	◯	◯	◯	◯

3. Na sua opinião, o critério temperatura de condensação de H2SO4 possui qual relevância com relação aos seguintes parâmetros:

	Índice de formação de incrustação	Índice de formação de escória	Teor de cloro	Umidade	Preço
1	◯	◯	◯	◯	◯
2	◯	◯	◯	◯	◯
3	◯	◯	◯	◯	◯
4	◯	◯	◯	◯	◯
5	◯	◯	◯	◯	◯
6	◯	◯	◯	◯	◯
7	◯	◯	◯	◯	◯
8	◯	◯	◯	◯	◯
9	◯	◯	◯	◯	◯

4. Na sua opinião, o critério índice de propensão à formação de incrustação possui qual relevância com relação aos seguintes parâmetros:

	Índice de formação de escória	Teor de cloro	Umidade	Preço
1	◯	◯	◯	◯
2	◯	◯	◯	◯
3	◯	◯	◯	◯
4	◯	◯	◯	◯
5	◯	◯	◯	◯
6	◯	◯	◯	◯
7	◯	◯	◯	◯
8	◯	◯	◯	◯
9	◯	◯	◯	◯

5. Na sua opinião, o critério índice de propensão à formação de escória possui qual relevância com relação aos seguintes parâmetros:

	Teor de cloro	Umidade	Preço
1	◯	◯	◯
2	◯	◯	◯
3	◯	◯	◯
4	◯	◯	◯
5	◯	◯	◯
6	◯	◯	◯
7	◯	◯	◯
8	◯	◯	◯
9	◯	◯	◯

6. Na sua opinião, o critério teor de cloro possui qual relevância com relação aos seguintes parâmetros:

	Umidade	Preço
1	◯	◯
2	◯	◯
3	◯	◯
4	◯	◯
5	◯	◯
6	◯	◯
7	◯	◯
8	◯	◯
9	◯	◯

7. Na sua opinião, o critério umidade da biomassa possui qual relevância com relação aos seguintes parâmetros:

	Preço
1	◯
2	◯
3	◯
4	◯
5	◯
6	◯
7	◯
8	◯
9	◯

APÊNDICE C

```
%% PASSO 1 - CRIAR MATRIZ DE DECISAO %%
%matriz exemplo

X = [18.8      0.85    77.32  3.46    0.03    0.05    35      300
     27.2      8.31    110.4  18.27   13.88   0.02    55      0.000001
     17        2.49    113.9  8.09    3.44    0.08    35      500
     17.73     5.21    91.82  7.71    1.39    0.000001        10      650
     18.7      2.92    113.5  0.52    0.36    0.03    50      240
     19.5      6.4     84.66  258.02  129.01  0.01    12.5    2100
     18        5.8     92.3   0.43    0.04    0.3     50      47.95];

%global criteria
[alternatives, criterio] = size(X);

     X_quadrado = X.^2
     X_soma = sqrt(sum(X_quadrado))
     X_normalizada = X./X_soma
     pesos = [0.3223  0.1772  0.1322  0.1231  0.1148  0.0503  0.0392  0.0409]
     X_ponderado = X_normalizada.*pesos
     for j =1:criterio
        identn(1, j) = input('Digite 1 para critério de maximizacao e 0 para criterio de
minimizacao:')
     end
     PIS = zeros(1, criterio)
     NIS = zeros(1, criterio)

     for j = 1:criterio
        if identn(1, j) == 1
           PIS(1,j) = max(X_ponderado(:,j))
           NIS(1,j) = min(X_ponderado(:,j))
        else identn(1, j) == 0
           PIS(1,j) = min(X_ponderado(:,j))
           NIS(1,j) = max(X_ponderado(:,j))
        end
     end
     dPIS = (X_ponderado - PIS).^2
     dNIS = (X_ponderado - NIS).^2
     Smais = sqrt(sum(dPIS,2))
     Smenos = sqrt(sum(dNIS,2))
     CI = Smenos./(Smais + Smenos)
     sorted_priority = sort(CI,'descend')
     [~, ranking] = ismember(CI,sorted_priority)
```

APÊNDICE D

```
clc; clear all; close all;

%% PASSO 1 - CRIAR MATRIZ DE DECISAO %%
%matriz exemplo
X = [18.8     0.85   77.32  3.46   0.03   0.05   35     300
     27.2     8.31   110.4  18.27  13.88  0.02   55     0.000001
     17       2.49   113.9  8.09   3.44   0.08   35     500
     17.73    5.21   91.82  7.71   1.39   0.000001      10     650
     18.7     2.92   113.5  0.52   0.36   0.03   50     240
     19.5     6.4    84.66  258.02 129.01 0.01   12.5   2100
     18       5.8    92.3   0.43   0.04   0.3    50     47.95];

[alternativas, criterio] = size(X);

     X_quadrado = X.^2
     X_soma = sqrt(sum(X_quadrado))
     X_normalizada = X./X_soma
    pesos = [0.3223  0.1772  0.1322  0.1231  0.1148  0.0503  0.0392  0.0409]
     X_ponderado = X_normalizada.*pesos

for j =1:criterio
        identn(1, j) = input('Digite 1 para critério de maximizacao e 0 para criterio de
minimizacao:')
end

% Step 3: Separar critérios de beneficio e custo
beneficio = identn == 1;
nao_beneficio = identn == 0;

% Step 4: Calculo da pontuação de cada alternativa
scores = zeros(alternativas, 1);

for i = 1:alternativas
   beneficio_soma = sum(X_ponderado(i, beneficio));
   nao_beneficio_soma = sum(X_ponderado(i, nao_beneficio));
   scores(i) = beneficio_soma - nao_beneficio_soma;
end

% Step 5: Ranqueamento das alternativas baseado na pontuação
[~, ranking] = sort(scores, 'descend')
```

APÊNDICE E

Seleção de biomassas alternativas para utilização como combustível em caldeiras

27 de jul. de 2024

O objetivo desta pesquisa é entender como é o processo de decisão realizado por especialistas e técnicos da área de geração de vapor para escolher uma biomassa alternativa para queima em grelhado de caldeiras industriais.

Para isso, é necessário o apoio de especialistas e técnicos que atuam na área.

Sou Letícia, discente do programa de mestrado em Bioenergia da Universidade Federal do Paraná. Estou desenvolvendo minha pesquisa com o objetivo de utilizar técnicas para tomada de decisão para seleção de combustíveis alternativos como fonte de energia renovável para caldeiras em agroindústrias localizadas no oeste paranaense. Estou imensamente grata por poder contar com seu apoio para o desenvolvimento deste estudo.

O objetivo deste questionário é avaliar como é realizado o processo de seleção de combustíveis alternativos que deverão ser queimados em conjunto com o combustível principal (cavaco de eucalipto) em uma caldeira equipada com grelha móvel, sob diferentes pontos de vista, no entanto, sob a ótica técnica de especialistas e técnicos que atuam na área.

Se imagine no seguinte cenário: você, gestor de uma unidade consumidora de cavaco de eucalipto para geração de vapor, combustível este já consolidado no mercado, recebe a proposta de utilizar um combustível alternativo adicional ao cavaco de eucalipto. Esse combustível pode ser um combustível lignocelulósico cultivado para fim energético ou pode ser um resíduo disponível com potencial de queima.

Utilize da tabela presente na questão 1 para ordenar, na sua opinião, quais seriam as melhores opções em ordem decrescente.

Depois, sua resposta será utilizada para comparar com o ranqueamento obtido através de métodos numéricos de apoio à tomada de decisão multicritério, objetivando contrastar a precisão de escolhas realizadas por métodos computacionais e decisores humanos.

Nota: todas as restrições impostas na SEMA nº 42/2008 devem ser respeitadas sempre e em toda escolha de um resíduo para ser utilizado como combustível. As alternativas aqui mencionadas estão de acordo com as legislações ambientais para queima de combustíveis.
Importante! Não é recomendado responder esta pesquisa em um smartphone.

1

De acordo com a tabela abaixo, que corresponde a caracterização das sete alternativas de biomassa, ordene na ordem decrescente (da melhor alternativa para menos atrativa) as alternativas de biomassa conforme seu julgamento.

Dica: para alterar a ordem, basta arrastar a alternativa entre as posições. A primeira alternativa é o cavaco de eucalipto, e ele se encontra para que você possa comparar sua caracterização entre as outras biomassas. O nome das biomassas não será divulgado nesse questionário para não induzir o entrevistado, e todos os dados de caracterização de biomassas foram retirados da literatura.

Abaixo uma breve explicação de cada critério.

PCS: Poder calorífico superior expresso em MJ/kg de matéria seca;
Teor de cinzas: expresso em %, demonstra a quantidade de material inerte no combustível;
Temperatura de condensação de H2SO4: expresso em graus Celsius, expressa a temperatura onde iniciam as condensações de H2SO4, gás corrosivo que pode deteriorar as estruturas da caldeira;
B/A: índice adimensional que expressa a tendência de formação de incrustação que um combustível possui, determinado através da composição elementar da fração inerte do combustível;
R: índice adimensional que expressa a tendência a formação de escória que o combustível possui, relacionado ao índice B/A e a presença de enxofre na composição elementar;
Teor de cloro: expresso em %, está relacionado a formação de gases tóxicos (dioxinas e furanos) bem como processos corrosivos em regiões de altas temperaturas;
Umidade: expresso em %, expressa a quantidade de umidade do combustível;
Preço: expresso em custo por tonelada (R$/ton) e (R$/kcal).

Alternativa	PCS (MJ/kg)	Teor de Cinzas (%)	Temperatura condensação H_2SO_4 (°C)	Referência	B/A	R	Teor de Cloro (%)	Referência	Umidade (%)	Preço (R$/ton)
CAVACO DE EUCALIPTO	18,8	0,85	77,32	Mantovan, 2022.	3,46	0,03	0,05	Burin et al, 2022.	35	300
LODO INDUSTRIAL DE ETE	27,2	8,31	110,4	Mantovan, 2022.	18,27	13,9	0,02	Burin et al, 2022.	55	-
BAMBUSA VULGARIS	17	2,49	113,9	Guarnette, 2013.	8,09	3,44	0,08	Maraver et al, 2016.	35	500
CASCA DE SOJA	17,73	5,21	91,82	Oliveira, 2015.	7,71	1,39	0	Wherter et al, 2000.	10	650
BAGAÇO DE CANA	18,7	2,92	113,5	Arantes, 2014.	0,52	0,36	0,03	Maraver et al, 2016.	50	240
RESÍDUO DE FARELO DE SOJA	19,5	6,4	84,66	Osborn, 1977.	258,02	129	0,01	Osborn, 1977.	12,5	2100
SORGO BIOMASSA	18	5,8	92,3	Oliveira, 2016.	0,43	0,04	0,3	Maraver et al, 2016.	50	47,95

Cavaco de eucalipto

Lodo industrial de ETE

Bambu Vulgaris

Casca de soja

Bagaço de cana

Resíduo de farelo de soja

Sorgo Biomassa

2

Neste espaço você pode inserir suas considerações.

APÊNDICE F

A perda pelos gases de combustão Q_g pode ser obtida através da equação abaixo:

$$Q_g = \left(\frac{44}{12}C \cdot \Delta H_{CO2} + \frac{64}{32}S \cdot \Delta H_{SO2} + (0{,}7685 \cdot m_{ar}(1+e) + N)\Delta H_{N2} + (9H + H_2O + (e+1) \cdot m_{ar} \cdot \omega)\Delta H_{H2O} + e \cdot \dot{m}_{ar} \cdot \Delta H_{ar}\right) \cdot \dot{m}_{gases\,,comb}$$

Em que C é o teor de carbono no combustível, ΔH_{CO2} é a entalpia do CO_2, S é o teor de enxofre no combustível, ΔH_{SO2} é a entalpia do SO_2, m_{ar} é a massa de ar seca estequiométrica, e é o excesso de ar nos gases de combustão, N é o teor de nitrogênio no combustível, ΔH_{N2} é a entalpia do N2, H é o teor de hidrogênio no combustível, H_2O é o teor de umidade no combustível, ω é a umidade específica do ar de combustão, ΔH_{H2O} é a entalpia da água, ΔH_{ar} é a entalpia do ar e $\dot{m}_{gases\,,comb}$ é a vazão mássica dos gases de combustão, definido pela equação abaixo:

$$\dot{m}_{gases} = \left(\frac{44}{12}C + \frac{64}{32}S + \frac{18}{2}H + U_{cb} + N + 0{,}7905 m_{ar,seco,esteq} \cdot (1+e) + 0{,}2095 m_{ar,seco,esteq} \cdot e + m_{ar,H2O}\right) \cdot \dot{m}_{cb}$$

Onde U_{cb} é a umidade do combustível, $m_{ar,seco,esteq}$ é a massa de ar seco estequiométrico e $m_{ar,H2O}$ é a massa de ar úmido.

A massa de ar seco estequiométrica pode ser determinada pela equação abaixo:

$$m_{ar,seco,esteq} = 138{,}2 \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32}\right)$$

A massa de ar seco está definida abaixo:

$$m_{ar,seco} = m_{ar,seco,esteq} \cdot (1+e)$$

A massa de ar úmido é definido abaixo:

$$m_{ar,H2O} = m_{ar,seco} \cdot \omega$$

O excesso é calculado pela equação abaixo, onde $\%O_2$ é o teor de oxigênio medido nos gases de combustão:

$$e = \frac{\%O_2}{21 - \%O_2}$$

As perdas por cinzas podem ser separadas em cinzas leves e cinzas pesadas, em que as cinzas pesadas são oriundas da fornalha, e as cinzas leves são oriundas do processo de multiciclone dos gases de combustão. A perda por cinzas é definida abaixo:

$$Q_{cz} = Q_{cz,leves} + Q_{cz,pesadas}$$

Onde as perdas por cinzas leves é obtida pela equação abaixo, em que A é a quantidade de cinzas do combustível, Fr_1 é a proporção de cinzas do combustível que saem pelo multiciclone e $\Delta H_{cz,leves}$ é definido por correlações disponíveis na norma ASME PTC 4 (ASME, 2013) :

$$Q_{cz,leves} = A \cdot Fr_1 \cdot \Delta H_{cz,leves} \cdot \dot{m}_{cb}$$
$$Q_{cz,leves} = A \cdot Fr_2 \cdot \Delta H_{cz,pesadas} \cdot \dot{m}_{cb}$$

A perda pelas purgas da caldeira foi estimada pela equação abaixo, onde $\dot{m}_{pg}$ é a vazão mássica de purgas e ΔH_{pg} é a entalpia do líquido saturado à pressão do tambor de vapor.

$$Q_{pg} = \dot{m}_{pg} \cdot \Delta H_{pg}$$

As perdas por queima parcial são subdivididas por perdas por carbono incombusto e perdas por CO não convertido em CO_2:

$$Q_{cp} = Q_{C,inc} + Q_{CO}$$

Onde a perda por carbono incombusto está definida abaixo, em que C_{inc} é a quantidade de carbono não queimado nas cinzas e PC_C é o poder calorífico do carbono.

$$Q_{C,inc} = \frac{C_{inc} \cdot A}{1 - C_{inc}} PC_C \cdot \dot{m}_{cb}$$

As perdas por CO não convertido em CO_2 é obtida pela equação abaixo, em que ρ_{CO} é a densidade do CO, V_{gases} é o volume de gases de combustão seco por unidade de massa de combustível queimado e PC_{CO} é o poder calorífico do CO.

$$Q_{CO} = \frac{CO \cdot \rho_{CO} \cdot V_{gases} \cdot PC_{CO} \cdot \dot{m}_{cb}}{10^6}$$

Em que o volume de gases estequiométrico de combustão seco por unidade de massa de combustível queimado é obtido através da equação abaixo:

$$V_{gases,esteq} = 106{,}7 \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32}\right)$$

Em que o volume de gases de combustão seco por unidade de massa de combustível queimado é obtido através da equação abaixo:

$$V_{gases} = 22{,}4 \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28}\right) + 0{,}7905 \cdot V_{gases,esteq} \cdot (1 + e) + 0{,}2095 \cdot V_{gases,esteq} \cdot e$$

As perdas por troca térmica das paredes do equipamento térmico foram estimadas sendo aproximada a 1% do potencial energético do combustível.

$$Q_{pa} = PCI \cdot \dot{m}_{cb} \cdot 0{,}01$$

Para calcular a eficiência global do sistema, são utilizadas as considerações que a operação segue em regime permanente, realizando um balanço de energia no sistema, resultando na equação abaixo.

$$\eta_c = (1 - \frac{Q_p - Q_{cr}}{Q_e})$$

O termo Q_{cr} é associado a energia do ar de combustão e a energia sensível do combustível quando pré-aquecidos. Caso o ar e o combustível forem admitidos no volume de controle em temperatura ambiente, Q_{cr} é considerado nulo e desconsiderado na equação, onde η_c é o rendimento térmico da caldeira, Q_p a energia associada aos gases de combustão, cinzas, purgas, combustão incompleta e por troca térmica com o ambiente, Q_e é o poder calorífico inferior.

O termo referente a energia associada aos gases de combustão, cinzas, purgas, combustão incompleta e por troca térmica com o ambiente é calculado atraves da equação abaixo.

$$Q_p = Q_g + Q_{cz} + Q_{pg} + Q_{cp} + Q_{pa}$$

APÊNDICE G

Abaixo os dados obtidos através do questionário entitulado “Análise multicritério para seleção de alternativas de biomassas” para os especialistas 1 e 2.

Especialista 1	PCS (MJ/kg)	Teor de Cinzas (%)	H2SO4	B/A	R	Teor de cloro (%)	Teor de umidade (%)	Preço (R$/MWh)
PCS (MJ/kg)	1	6	3	2	1	7	8	9
Teor de Cinzas (%)	0,17	1,00	8,00	1,00	2,00	4,00	9,00	5,00
h2so4	0,33	0,13	1,00	3,00	4,00	5,00	1,00	9,00
b/a	0,50	1,00	0,33	1,00	1,00	2,00	3,00	4,00
r	1,00	0,50	0,25	1,00	1,00	1,00	2,00	9,00
Teor de cloro (%)	0,14	0,25	0,20	0,50	1,00	1,00	8,00	9,00
Teor de umidade (%)	0,13	0,11	1,00	0,33	0,50	0,13	1,00	1,00
Preço (R$/MWh)	0,11	0,20	0,11	0,25	0,11	0,11	1,00	1,00

Especialista 2	PCS (MJ/kg)	Teor de Cinzas (%)	H2SO4	B/A	R	Teor de cloro (%)	Teor de umidade (%)	Preço (R$/MWh)
PCS (MJ/kg)	1	8	1	4	3	2	7	9
Teor de Cinzas (%)	0,13	1	1	8	9	3	2	4
h2so4	1	1	1	2	3	4	7	1
b/a	0,25	0,13	0,50	1	8	9	4	2
r	0,33	0,11	0,33	0,13	1	9	6	2
Teor de cloro (%)	0,50	0,33	0,25	0,11	0,11	1	1	2
Teor de umidade (%)	0,14	0,50	0,14	0,25	0,17	1	1	9
Preço (R$/MWh)	0,11	0,25	1,00	0,50	0,50	0,50	0,11	1