

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**EDWARD SEABRA JÚNIOR**

**MODELO DE APOIO À DECISÃO PARA SELEÇÃO DE BIOMASSAS DA  
PECUÁRIA E TIPOS DE BIODIGESTORES COM ABORDAGEM MULTICRITÉRIO**

**PONTA GROSSA**

**2022**

**EDWARD SEABRA JÚNIOR**

**MODELO DE APOIO À DECISÃO PARA SELEÇÃO DE BIOMASSAS DA  
PECUÁRIA E TIPOS DE BIODIGESTORES COM ABORDAGEM MULTICRITÉRIO**

**Decision suport model for the selecion of livestock biomasses and types of  
biodigestors with a multicriteria approach**

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Colmenero

**PONTA GROSSA**

**2022**



**4.0 Internacional**

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

05/01/2023 17:05



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Ponta Grossa



---

**EDWARD SEABRA JÚNIOR**

**MODELO DE APOIO À DECISÃO PARA SELEÇÃO DE BIOMASSAS DA PECUÁRIA E TIPOS DE BIODIGESTORES COM ABORDAGEM MULTICRITÉRIO**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 07 de dezembro de 2022

Dr. João Carlos Colmenero, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Aldo Braghini Junior, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Fabio Neves Puglieri - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Reginaldo Ferreira Santos, Doutorado - Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste)

Dr. Vicente Rodrigues Montequin, Doutorado - Universidad de Oviedo

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 05/01/2023.

Dedico este trabalho à memória de meu  
pai Edward Seabra que, por uma  
fatalidade, não pôde estar presente em  
vida para compartilhar esta conquista.

## **AGRADECIMENTOS**

Inicialmente, a Deus, por ter me concedido discernimento, lucidez, inspiração, maturidade e equilíbrio; habilidades necessárias para chegar até aqui sem fraquejar diante dos desafios.

À minha família pelo apoio incondicional em todas as etapas da minha vida, pois sem eles todos meus projetos seriam inviáveis.

À minha querida amiga Ana Célia Klas Blanski, pelo companheirismo, amparo psicológico, emocional e espiritual. Conviver com você foi um grande privilégio. Tenho por você muito carinho e consideração.

À minha amiga e colega de trabalho, Reinalda Blanco Pereira, pelas conversas, dicas, motivações ao longo da jornada.

Ao amigo e colega de trabalho, Ismael Burgardt, pela parceria, troca de ideias sobre carreira, projetos pessoais, profissionais e assuntos diversos.

Aos colegas de laboratório e aos amigos Antão Rodrigo Valentim, Matheus Neves Almeida e Pedro Filipe da Conceição, pela troca de ideias e experiências, pela parceria em momentos difíceis e de descontração.

Ao professor, Dr. Aldo Braghini Júnior, grande parceiro neste projeto, por ter se colocado à disposição sempre que solicitado, além do apoio e suporte técnico valioso durante a condução da pesquisa.

Ao professor, Dr. Vicente Rodrigues Montequin, da Universidade de Oviedo-ES, grande parceiro neste projeto, pelo esforço empreendido no processo de mobilidade acadêmica e pela disponibilidade sempre que solicitado, mesmo à distância.

Ao professor orientador, Dr. João Carlos Colmenero, pela confiança e compreensão, por ter compartilhado seu conhecimento através de orientações técnicas fundamentais para conduzir este projeto.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro para a condução da referida pesquisa (Cod. 001)

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, ao dispor a estrutura necessária para minha formação acadêmica e profissional.

Dê à ignorância um ponto final.  
Faça uma lavagem cerebral!  
(Gabriel, O pensador, 2003)

## RESUMO

A biomassa é qualquer material orgânico que, através de processos biotecnológicos, é decomposta em dois produtos básicos: o biofertilizante e o biogás. O biogás é uma importante fonte de energia renovável, resultante da tecnologia da biodigestão anaeróbia empregada no aproveitamento da biomassa e pode ser utilizado para diversas finalidades como: queima simples, cogeração, aquecimento, acionamento de motores, biocombustíveis e até geração de energia elétrica. Existem três etapas básicas que se inter-relacionam no processo como um todo, são elas: seleção da biomassa; seleção do biodigestor; seleção da finalidade de utilização do biogás. Dentro de cada etapa, o responsável pelo projeto carece de tomar decisões complexas, sob o risco de inviabilizar tecnicamente o projeto caso uma escolha seja feita de forma equivocada, ou seja, aumentar custos, não produzir um biogás de qualidade, não conseguir deixar a matéria orgânica inerte por algum erro de dimensionamento. Desta feita, o objetivo deste estudo foi propor um procedimento metodológico para suporte à decisão com etapas sequenciais, iterativas e com o suporte de métodos multicritério, no intuito de fornecer um suporte técnico ao decisor, com vistas na resolução de problemas de seleção de biomassa e de tipos de biodigestores. Os resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia foram realizados em dois estudos de caso e demonstraram que, a partir da aplicação, foi possível obter respostas consistentes, tanto para a seleção de biomassas quanto para seleção do tipo de biodigestores confirmadas pela análise de sensibilidade.

Palavras-chave: biomassa, biodigestores, biogás, multicritério

## **ABSTRACT**

Biomass is any organic material that, through biotechnological processes, is decomposed into two basic products: biofertilizer and biogas. Biogas is an important source of renewable energy, resulting from the technology of anaerobic digestion used in the use of biomass and can be used for various purposes such as: simple burning, cogeneration, heating, motor drive, biofuels and even electricity generation. There are three basic steps that are interrelated in the process as a whole, they are: biomass selection; biodigester selection; selection of the purpose for using the biogas. Within each stage, the person responsible for the project needs to make complex decisions, at the risk of making the project technically unfeasible if a choice is made wrongly, increasing costs, not producing quality biogas, not being able to leave the organic matter inert for some sizing error. This time, the objective of this study was to propose a methodological procedure for decision support with sequential, iterative steps and with the support of multicriteria methods, in order to provide technical support to the decision maker with a view to solving problems of biomass selection and types of biodigesters. The results obtained through the application of the methodology were carried out in two case studies and demonstrated that, from the application, it was possible to obtain consistent answers both for the selection of biomasses and for the selection of the type of biodigesters confirmed by the sensitivity analysis.

Keywords: biomass, biodigester, biogas, multicriteria

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Estrutura do trabalho.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 2 - Biomassas da agricultura.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 3 - Etapas do processo de biodigestão anaeróbia .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 4 - Etapas de aplicação da metodologia de seleção de biomassa e de biodigestores.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 5 - Estrutura de funcionamento de uma planta de biogás.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 6 - Estrutura hierárquica genérica para os problemas.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 7 - Etapas iterativas para seleção da biomassa .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 8 - Estrutura hierárquica do problema de seleção de biomassas, critérios e alternativas .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 9 - Etapas iterativas para seleção do biodigestor .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 10 - Estrutura hierárquica do problema de seleção do biodigestor, alternativas e critérios .....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 11 - Relação em rede das palavras-chave do portefólio bibliográfico e das bases Scopus e ScienceDirect .....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 12 - Relação em rede de palavras-chave encontradas somente nos artigos do portefólio bibliográfico .....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 13 - Relação da palavra-chave versus o ano de citação .....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 14 - Aplicação do AHP para critérios de seleção da biomassa.....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 15 - Aplicação do AHP para critérios de seleção do biodigestor.....</b>	<b>104</b>

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1 - Número Fuzzy ñ</b> .....	<b>34</b>
<b>Gráfico 2 - Número Fuzzy ñ com <math>\alpha</math>-cut</b> .....	<b>35</b>
<b>Gráfico 3 - Número Fuzzy triangular ñ</b> .....	<b>36</b>
<b>Gráfico 4 - Três números Fuzzy triangulares</b> .....	<b>39</b>
<b>Gráfico 5 - Análise de sensibilidade para C1 (Produção de Biomassa)</b> .....	<b>67</b>
<b>Gráfico 6 - Análise de sensibilidade para C2 (Produção de Biogás)</b> .....	<b>68</b>
<b>Gráfico 7 - Análise de sensibilidade para C3 (Capacidade Energética)</b> .....	<b>68</b>
<b>Gráfico 8 - Análise de sensibilidade para C4 (Custo Logístico)</b> .....	<b>69</b>
<b>Gráfico 9 - Análise de sensibilidade para C1 (Custos de Instalação)</b> .....	<b>74</b>
<b>Gráfico 10 - Análise de sensibilidade para C2 (Limpeza e Manutenção)</b> .....	<b>75</b>
<b>Gráfico 11 - Análise de sensibilidade para C3 (Eficiência no Tratamento)</b> .....	<b>76</b>
<b>Gráfico 12 - Análise de sensibilidade para C4 (Volume de Biogás)</b> .....	<b>78</b>
<b>Gráfico 13 - Análise de sensibilidade para C5 (Vida Útil)</b> .....	<b>79</b>
<b>Gráfico 14 - Análise de sensibilidade para C6 (Fluxo de Alimentação)</b> .....	<b>80</b>

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1 - Portifólio bibliográfico de referência quanto à definição de critérios e alternativas .....</b>	<b>49</b>
<b>Quadro 2 - Rol exemplificativo de critérios para seleção da biomassa .....</b>	<b>50</b>
<b>Quadro 3 - Portifólio bibliográfico de referência quanto à definição de critérios para seleção de biodigestores .....</b>	<b>54</b>
<b>Quadro 4 - Rol exemplificativo de critérios para seleção do biodigestor .....</b>	<b>55</b>
<b>Quadro 5 - Resultados e ordenação das alternativas .....</b>	<b>65</b>
<b>Quadro 6 - Comparação par a par dos critérios para seleção de biomassa.....</b>	<b>98</b>
<b>Quadro 7 - Comparação par a par dos critérios para o biodigestor .....</b>	<b>100</b>
<b>Quadro 8 - Resultado da avaliação dos critérios pelos três especialistas .....</b>	<b>106</b>
<b>Quadro 9 - Resultado da avaliação das alternativas pelo especialista 1 .....</b>	<b>108</b>
<b>Quadro 10 - Resultado da avaliação das alternativas pelo especialista 2 .....</b>	<b>108</b>
<b>Quadro 11 - Resultado da avaliação das alternativas pelo especialista 3 .....</b>	<b>108</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Biomassas da pecuária e características para geração de biogás ...	24
Tabela 2 - Tipos de biodigestores e características.....	30
Tabela 3 - Escala de Saaty.....	31
Tabela 4 - Estrutura genérica padrão de qualquer matriz de decisão .....	32
Tabela 5 - Quantidade de biomassa por animais e por município no estado do Paraná.....	59
Tabela 6 - Parâmetros para quantificação de critérios .....	60
Tabela 7 - Quantitativo de animais, estrume total, sólidos secos e rendimento do biogás por município considerando bovinos .....	60
Tabela 8 - Quantitativo de animais, estrume total, sólidos secos e rendimento do biogás por município considerando equinos .....	61
Tabela 9 - Quantitativo de animais, estrume total, sólidos secos e rendimento do biogás por município considerando suínos .....	61
Tabela 10 - Quantitativo de animais, estrume total, sólidos secos e rendimento do biogás por município considerando ovinos .....	61
Tabela 11 - Quantitativo de animais, estrume total, sólidos secos e rendimento do biogás por município considerando galináceos .....	61
Tabela 12 - Detalhamento do cálculo do custo logístico por biomassa.....	62
Tabela 13 - Resultado do método AHP (Analytic Hierarchy Process ) .....	63
Tabela 14 - Matriz de decisão para início da aplicação do método Topsis .....	63
Tabela 15 - Matriz de decisão para seleção da biomassa.....	64
Tabela 16 - Matriz R.....	64
Tabela 17 - Matriz V .....	64
Tabela 18 - Matriz de Soluções ideais (S*). .....	65
Tabela 19 - Matriz de Soluções anti-ideais (S-). .....	65
Tabela 20 - Critérios avaliados pelas variáveis linguísticas traduzidos em números Fuzzy triangulares .....	71
Tabela 21 - Agregação dos pesos dos critérios .....	72
Tabela 22 - Resultado da aplicação do Método AHP (Analytic Hierarchy Process).....	72
Tabela 23 - Dados para soluções anti-ideais .....	72
Tabela 24 - Dados para soluções anti-ideais .....	73
Tabela 25 - Ordenação das alternativas .....	73

<b>Tabela 26 - Resultado da busca nas bases Scopus e ScienceDirect .....</b>	<b>93</b>
<b>Tabela 27 - Variáveis linguísticas para avaliação dos critérios .....</b>	<b>106</b>
<b>Tabela 28 - Variáveis linguísticas para avaliação das alternativas .....</b>	<b>108</b>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>18</b>
1.1.1	Objetivo geral .....	18
1.1.2	Objetivos específicos.....	18
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>19</b>
<b>1.3</b>	<b>Delimitação do tema e da aplicação do método</b> .....	<b>19</b>
1.3.1	Entendimento do contexto da proposta do trabalho .....	19
1.3.2	Estrutura da pesquisa.....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>Biomassa</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2</b>	<b>Caracterização da biomassa da pecuária</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3</b>	<b>O aproveitamento da biomassa - biogás</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4</b>	<b>O processo de biodigestão anaeróbia</b> .....	<b>25</b>
2.4.1	Etapas da biodigestão anaeróbia .....	26
2.4.1.1	<u>Hidrólise</u> .....	<u>26</u>
2.4.1.2	<u>Acidogênese</u> .....	<u>26</u>
2.4.1.3	<u>Acetogênese</u> .....	<u>27</u>
2.4.1.4	<u>Metanogênese</u> .....	<u>27</u>
<b>2.5</b>	<b>Características importantes da biomassa</b> .....	<b>27</b>
2.5.1	Carbono fixo .....	27
2.5.2	Poder calorífico da biomassa .....	28
2.5.3	Percentual de cinzas .....	28
2.5.4	Sólidos voláteis.....	28
2.5.5	Carbono, hidrogênio e oxigênio.....	28
2.5.6	Nitrogênio e enxofre - N <sub>2</sub> e S.....	29
2.5.7	Amônia - NH <sub>3</sub> .....	29
<b>2.6</b>	<b>Biodigestor</b> .....	<b>29</b>
2.6.1	Tipos de biodigestores e características .....	30
<b>2.7</b>	<b>Métodos multicritérios utilizados</b> .....	<b>31</b>
2.7.1	Analytic Hierarchy Process - AHP .....	31
2.7.2	Método <i>Fuzzy</i> .....	33

2.7.3	Método Topsis .....	33
2.7.4	Método <i>Fuzzy</i> -Topsis .....	33
2.7.5	Aplicação do <i>Fuzzy</i> -Topsis .....	40
2.7.6	Aplicação de Métodos Multicritérios em estudos relacionados .....	43
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>Etapa 1 - identificação / definição dos stakeholders</b> .....	<b>44</b>
<b>3.2</b>	<b>Etapa 2 - brainstorming com especialistas</b> .....	<b>45</b>
3.2.1	Procedimento para definição de critérios em cada caso .....	47
<b>3.3</b>	<b>Etapa 3 - seleção da biomassa</b> .....	<b>48</b>
3.3.1	Definição de alternativas de biomassa .....	48
3.3.2	Definição de critérios para seleção da biomassa .....	49
3.3.2.1	<u>Capacidade de produção de biomassa</u> .....	<u>51</u>
3.3.2.2	<u>Potencial de biogás gerado pela biomassa</u> .....	<u>51</u>
3.3.2.3	<u>Capacidade energética da biomassa</u> .....	<u>52</u>
3.3.2.4	<u>Custo com a logística da biomassa</u> .....	<u>52</u>
<b>3.4</b>	<b>Etapa 4 - definição e aplicação do MCDM</b> .....	<b>52</b>
<b>3.5</b>	<b>Etapa 5 - seleção do biodigestor</b> .....	<b>53</b>
3.5.1	Definição das alternativas de biodigestor .....	53
3.5.2	Definição de critérios para a seleção do biodigestor .....	53
<b>3.6</b>	<b>Etapa 6 - definição e aplicação do MCDM</b> .....	<b>55</b>
<b>3.7</b>	<b>Etapa 7 - análise de sensibilidade</b> .....	<b>56</b>
<b>3.8</b>	<b>Etapa 8 - tomada de decisão</b> .....	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>58</b>
4.1	Seleção da biomassa .....	58
4.2	Seleção do biodigestor .....	69
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>81</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>83</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>84</b>
	<b>APÊNDICE A - Procedimento bibliográfico</b> .....	<b>92</b>
	<b>APÊNDICE B - Questionário para avaliação da importância dos critérios</b> .....	<b>96</b>
	<b>APÊNDICE C - Resultado da aplicação do método ahp para obtenção dos pesos para os critérios relativos à seleção da biomassa</b> .....	<b>101</b>
	<b>APÊNDICE D - Resultado da aplicação do método ahp para</b>	

<b>obtenção dos pesos para os critérios relativos à seleção do tipo de biodigestor.....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE E - Avaliação dos critérios pelas variáveis linguísticas utilizando o número fuzzy triangular .....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE F - Avaliação das alternativas pelas variáveis linguísticas utilizando o número fuzzy triangular .....</b>	<b>107</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A preocupação mundial com as mudanças climáticas intensas, com os desastres naturais frequentes, com a finitude e escassez de recursos ambientais ganhou força, principalmente, após a Assembleia Geral das Nações Unidas, realizada em Nova York, no ano de 2015, para tratar, entre outros assuntos, a importância de frear a exploração ambiental de forma exacerbada. Muitos destes impactos negativos são potencializados pela atividade humana através de uma relação de pouco cuidado com o meio ambiente.

A sociedade vem concentrando esforços para encontrar fontes alternativas para a produção de energia. Vários países e instituições estão buscando implementar um marco regulatório conjunto para difundir as energias renováveis, variando as fontes de abastecimento de energia através da substituição de recursos energéticos convencionais (TURSI, 2019).

Os resíduos orgânicos, também conhecidos como biomassa, merecem atenção particular pela sua abundância e pelo seu potencial de gerar energia, portanto, podem ser reaproveitados através de processos biotecnológicos que permitem reduzir o potencial poluente deste material e produzir energia (LEE *et al.* 2019; WANG; SUN; WU, 2019).

Existem vários tipos de biomassa e cada uma com características particulares para geração de biogás: resíduos orgânicos e biológicos, resíduos alimentares, resíduos da indústria alimentar e resíduos vegetais como milho, beterraba sacarina, sacarina e resíduos de ração animal.

Na atividade de pecuária, por exemplo, os dejetos gerados por animais criados em confinamento representam grande volume na geração de resíduos também chamados de biomassa animal. Por serem altamente poluentes esses resíduos devem ser gerenciados e tratados antes de seu descarte no meio ambiente. Uma forma eficiente de tratá-los é utilizá-los como matéria-prima em biodigestores para produção de biogás (RODRÍGUEZ; GAUTHIER-MARADEI; ESCALANTE, 2017).

A falta de controle e gestão inadequada da geração da biomassa animal, além de aumentar problemas como a poluição de rios, pastagens e solos e a contaminação do lençol freático, representa grande desperdício, uma vez que estes resíduos possuem elevado potencial para geração de energia (AVCIOĞLU; TÜRKER, 2012).

A energia proveniente da biomassa traz impactos positivos nas mais diversas

frentes, sobretudo na substituição de combustíveis fósseis. Sua utilização como fonte de energia renovável permite reduzir substancialmente os impactos ambientais ligados à utilização de combustíveis convencionais (DALENA; BASILE; ROSSI, 2017; TURSI, 2019).

Das várias fontes de energia, a biomassa tem sido bastante requisitada em debates energéticos mundiais, principalmente nos países da União Europeia, que buscam fomentar medidas de preservação ambiental nos planos estratégicos a nível de desenvolvimento. A biomassa, portanto, tem potencial para representar um papel de destaque como fonte de energia renovável (LAURI *et al.* 2014; TURSI, 2019).

Como a preocupação mundial em relação ao tratamento e aproveitamento dos resíduos é crescente, torna-se necessária a aplicação de medidas de gerenciamento que busquem mitigar problemas ambientais através de técnicas como: análise de seu ciclo de vida, alternativas de tratamento e aproveitamento como forma de energia, (PAUER *et al.* 2020).

A melhor alternativa para o tratamento da biomassa é o processo de decomposição através da biodigestão anaeróbia. Neste tipo de tratamento, é utilizado um sistema biodigestor no qual o material orgânico é inserido e mantido com ausência de oxigênio até se decompor. Ao final do processo, a biomassa (que antes era poluente) torna-se inerte, além de gerar dois subprodutos, o biofertilizante e o biogás. A utilização do biogás como fonte de energia pode atender as demandas de energia da indústria e pode reduzir custos do processo produtivo (NEVZOROVA; KUTCHEROV, 2019).

O biogás é o produto da biodigestão anaeróbia da biomassa e pode ser utilizado como fonte de energia na geração de calor, eletricidade e como biocombustível em veículos. A geração do biogás é vantajosa também por contribuir no controle dos resíduos orgânicos, redução de gases de efeito estufa (TALEGHANI; KIA SHABANI, 2005; BALAT; BALAT, 2009).

Ele tem capacidade de substituir o gás natural nas mesmas aplicações, as mais comuns são a queima e geração de eletricidade e, em alguns casos, ele também pode ser utilizado como combustível veicular (KHAN *et al.* 2014; NEVZOROVA; KUTCHEROV, 2019).

O biogás é formado por uma mistura de metano, dióxido de carbono com pequenas quantidades de outros gases. Sua composição aproximada é de 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de outros gases como hidrogênio,

nitrogênio, gás sulfídrico, oxigênio, monóxido de carbono, amônia e aminas voláteis. Esses percentuais vão variar em função do tipo de resíduo que foi utilizado e da eficiência do tratamento da biomassa. O componente principal do biogás (que determina a sua qualidade e o que se busca aumentar) é o percentual de metano devido a sua relação direta com a produção de energia térmica (HIREMATH *et al.* 2009; FIGUEIREDO, 2012; MCKENDRY, 2012).

A qualidade do biogás depende do material que lhe dá origem, ou seja, a biomassa que deu origem ao biogás vai fornecer a ele características particulares. Quanto maior o percentual de matéria orgânica na biomassa, maior será o potencial de produção de energia. Quanto à idade da biomassa, percebe-se que quanto mais novo é o resíduo, maior é o potencial de geração de metano, quando comparados a resíduos mais antigos, uma vez que estes já iniciaram seu processo de decomposição (FIGUEIREDO, 2012).

Para produção e aproveitamento da biomassa como fonte de energia, existem algumas características desejáveis como: a facilidade de obtenção, alto rendimento energético, composição com poucos contaminantes, boa relação custo-benefício na sua obtenção e manipulação, baixa necessidade de complementação com nutrientes (MCKENDRY, 2002).

A tecnologia de tratamento de biomassa possui particularidades que devem ser levadas em consideração ao implementar o sistema biodigestor de modo a garantir a viabilidade do projeto. Os custos de investimento na planta biodigestora podem ser elevados e estão mais relacionados com a características da biomassa do que ao tamanho do sistema (RAMOS-SUÁREZ *et al.*, 2019)

Uma gestão eficiente de todas as atividades envolvidas no aproveitamento da biomassa, torna-se fundamental para garantir a sustentabilidade de todo o sistema. Assim, alguns aspectos devem ser destacados, a saber: a seleção/escolha de biomassa; logística; informações do ponto de coleta até o ponto de disposição; tratamentos aplicados para potencializar a produção de energia; uso de produtos e subprodutos; e, a capacidade de reduzir os gases de efeito estufa (LI *et al.*, 2012; DE MEYER *et al.* 2014; HARSONO; GRUNDMANN; SOEBRINTO, 2014).

A incorporação de todos os fatores, desde a seleção da biomassa, passando pelo tipo de biodigestor mais adequado, com vistas a produzir um biogás de boa qualidade, além de buscar assegurar a viabilidade do projeto, torna complexa a tomada de decisão.

Neste sentido, métodos de decisão multicritério têm sido utilizados como ferramenta de auxílio à tomada de decisão em diversos contextos. Eles funcionam permitindo a análise de um conjunto de alternativas que estão vinculadas a diferentes critérios, em alguns casos, conflitantes e, por meio dessa relação matemática entre critérios e alternativas, torna-se possível chegar a um *ranking* das respostas que vão da mais preferível até a menos preferível (HARSONO; GRUNDMANN; SOEBRANTO, 2014).

Levando em consideração a influência da biomassa e do tipo de biodigestor no processo de obtenção do biogás, a importância da tomada de decisão assertiva com relação a sua escolha para viabilidade do projeto, este trabalho teve objetivo de contribuir com a temática, respondendo o seguinte questionamento: como será o procedimento de decisão mais apropriado para embasar a tomada de decisão sobre a escolha da melhor biomassa e do sistema biodigestor para o projeto?

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa foi propor uma metodologia para suporte à decisão em problemas de seleção de biomassas e de tipo de biodigestor com a utilização de multicritério.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Definir uma sequência de etapas para realizar a seleção de biomassa e do tipo de biodigestor;
- Propor critérios para seleção da biomassa e do biodigestor;
- Avaliar a importância de cada critério em função das características de aplicação;
- Aplicar o método multicritério em cada caso;
- Definir a melhor biomassa e melhor biodigestor;
- Testar a consistência dos resultados obtidos.

## 1.2 Justificativa

No processo de produção de biogás, a seleção da biomassa é a primeira etapa de decisão e deve ser realizada com muito cuidado em função de seu impacto direto na qualidade do gás que será produzido. Desta forma, a seleção da biomassa é considerada um problema de natureza complexa, ou seja, é uma etapa que influencia todas as outras (BATZIAS; SIDIRAS; SPYROU, 2005; SCARLAT *et al.*, 2018).

Devido às dificuldades envolvidas nos processos de seleção de biomassa e na seleção do tipo do biodigestor, surge a necessidade de estabelecer uma metodologia que dê suporte à tomada de decisão, que seja flexível e passível de adaptação aos diferentes contextos e projetos.

A metodologia de tomada de decisão deve ser fundamentada em critérios importantes para o processo de produção de biogás e que contribua com um procedimento de seleção de biomassa e do tipo de biodigestor com viés técnico e não empírico.

Levando em consideração a complexidade inerente ao processo decisório, a abrangência e impacto de um projeto de instalação de um sistema biodigestor, a proposta de metodologia buscou solucionar o problema contemplando os vários aspectos técnicos, financeiros, econômicos, ambientais em sua estrutura e, além disso, fazer uso do material científico atual a respeito do tema.

## 1.3 Delimitação do tema e da aplicação do método

### 1.3.1 Entendimento do contexto da proposta do trabalho

A contextualização do problema está focada na compreensão de parâmetros gerenciais do projeto de instalação de uma planta produtora de biogás, especificamente na seleção da biomassa e do tipo de biodigestor.

O estudo propõe uma metodologia que auxilie o decisor a selecionar a melhor biomassa e o melhor biodigestor com a premissa na identificação e definição de critérios que influenciam na obtenção e, também, na utilização do biogás valendo-se de um suporte matemático dos métodos multicritério.

É importante destacar que existem dois enfoques de parâmetros que devem ser monitorados em um processo de obtenção o biogás: *a) parâmetros da biomassa*

*no interior do biodigestor e b) parâmetros do projeto de instalação do sistema biodigestor visando a produção e utilização do biogás.*

Outro ponto a destacar é que, apesar de o trabalho comentar sobre a existência de vários tipos de biomassas diferentes, a metodologia se aplica, especificamente, considerando parâmetros da biomassa da pecuária. No caso de aplicação para outros tipos de biomassas, é necessário consultar os especialistas sobre a inserção de critérios específicos que sejam característicos das alternativas de biomassas consideradas.

Os parâmetros no interior do biodigestor são variáveis físico-químicas e, para sua determinação, faz-se necessária a realização de experimentos, ensaios com estufas e muflas, amostragens, testes de bancada em laboratório e serão comentadas no decorrer do estudo, no entanto, não serão o foco da aplicação da metodologia proposta por este trabalho.

Neste estudo, a proposta foi direcionada aos parâmetros de gestão do projeto de instalação do biodigestor visando a produção e utilização do biogás como fonte de energia, ou seja, a abordagem proposta neste trabalho contempla a análise de parâmetros como: o custo com a logística da biomassa, sua capacidade para a produção de biogás, seu potencial energético, demais aspectos gerenciais e de estruturação das decisões que devem ser levados em conta para selecionar a melhor biomassa e tipo de biodigestor em cada projeto.

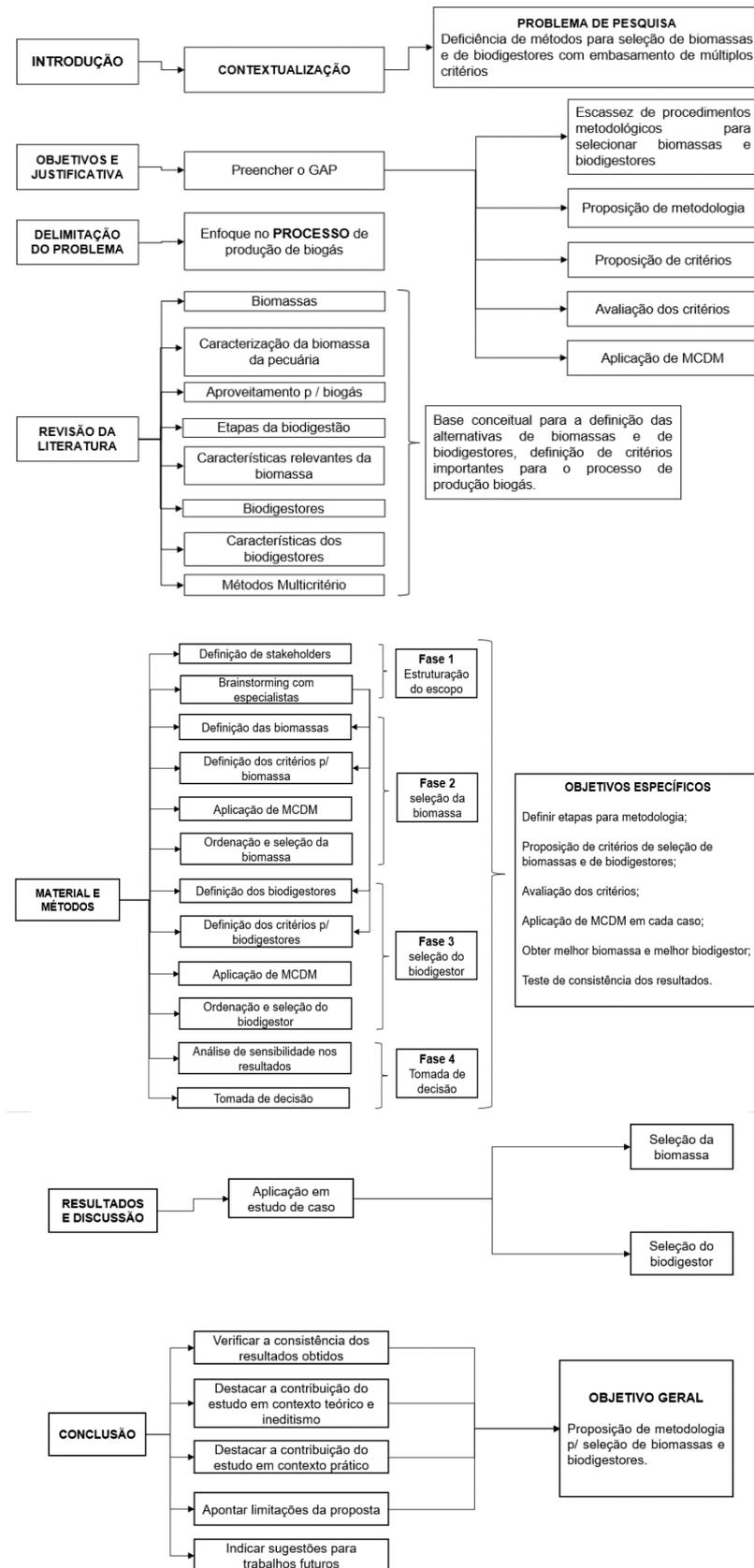
Os parâmetros que determinam a escolha da biomassa são diversos, mas os mais importantes consideram o produto final renovável que se objetiva buscar, a qualidade e a quantidade da biomassa e o custo do processo (DALENA; BASILE; ROSSI, 2017).

Portanto, o projetista deve considerar parâmetros operacionais mínimos e ter requisitos para proceder a escolha da biomassa, pois um projeto bem sucedido deve ser visar a eficiência na decomposição do material para geração de um biogás de qualidade (NJUGUNA MATHERI *et al.*, 2018).

### 1.3.2 Estrutura da pesquisa

A Figura 1 apresenta a estrutura em que o trabalho foi desenvolvido desde a introdução até a conclusão.

Figura 1 - Estrutura do trabalho



Fonte: Autoria própria (2022).

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

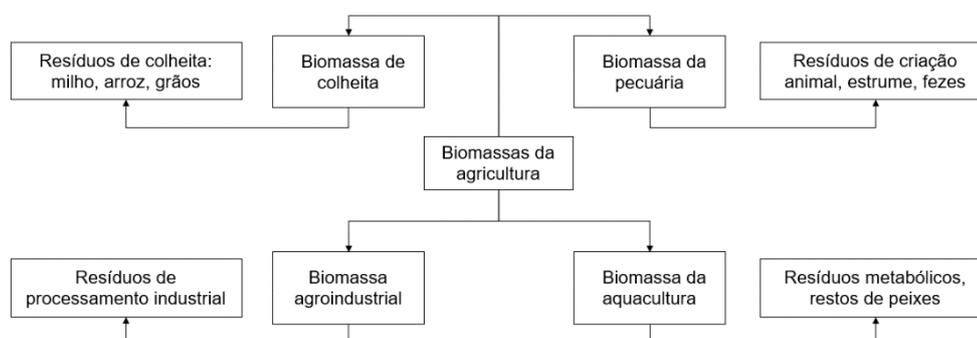
### 2.1 Biomassa

A biomassa nada mais é do que um produto sólido complexo disponível na natureza e derivado de organismos vivos. Pode ser biologicamente orgânica ou não orgânica. Toda biomassa, seja ela animal (proveniente de esterco animal, lodo, papel e resíduos orgânicos industriais), pode ser utilizada na geração de energia, uma vez que, em sua composição, também possui compostos complexos orgânicos e não orgânicos. Gerar energia por meio da biomassa é a alternativa mais indicada para solucionar a crise energética mundial. Essa fonte de energia tem a capacidade de produzir diversas formas de combustível. Há uma escalada nas novas tecnologias para produção de energia renovável a partir da biomassa e a busca pelas energias renováveis cresceu significativamente (HALL, 1997; DIN *et al.*, 2021a).

As biomassas apresentam em sua composição uma mistura de polímeros orgânicos compostos por moléculas que contêm oxigênio. Dependendo do tipo de biomassa, outros componentes também podem estar presentes como: a celulose, lignina, hemiceluloses, minerais inorgânicos e extrativos orgânicos (MOHAN; PITTMAN; STEELE, 2006).

As biomassas da agricultura se dividem em quatro classes: biomassa de colheita; biomassa da agroindústria, biomassa de aquicultura e biomassa da pecuária. Alguns exemplos podem ser vistos na Figura 2.

**Figura 2 - Biomassas da agricultura**



**Fonte: Adaptado de Koul, Yakoob e Shah (2022).**

## 2.2 Caracterização da biomassa da pecuária

A biomassa da pecuária é formada, basicamente, por dejetos/estrumes de animais e água utilizada na limpeza dos locais de confinamento de animais. São resíduos sólidos gerados na criação dos animais como: cama de frango, silagem, esterco sólido ou esterco líquido de animais como bovinos, porcos, cavalos, ovelhas, aves. Esse material é rico em nutrientes, caso não seja feito um manejo adequado, pode provocar contaminação severa dos rios e do lençol freático, além de produzir gases do efeito estufa em sua decomposição (HOLM-NIELSEN; AL SEADI; OLESKOWICZ-POPIEL, 2009).

Em todos os países, a geração de resíduos da pecuária produzida a cada ano é gigantesca. Em virtude disso, é necessário um manejo adequado, reutilizando-os ou valorizando-os estrategicamente para a geração de produtos de valor agregado, a fim de permitir um desenvolvimento mais limpo e sustentável em cooperação com o meio ambiente (KOUL; YAKOUB; SHAH, 2022).

A capacidade de produção de energia da biomassa trata-se do seu potencial de produção de biogás e consiste em um fator fundamental e que deve ser considerado no processo de seleção da biomassa (BATZIAS; SIDIRAS; SPYROU, 2005; SCARLAT *et al.*, 2018).

A biodigestão anaeróbia tem como objetivo converter estes resíduos em dois produtos valiosos: o biogás (combustível renovável utilizado para produzir eletricidade, calor ou como combustível); e, o biofertilizante (biomassa digerida rica em nitrogênio, fósforo e potássio) (HOLM-NIELSEN; AL SEADI; OLESKOWICZ-POPIEL, 2009).

Conforme aponta Rupf *et al.* (2017), a biomassa da pecuária apresenta um relevante potencial para a geração de biogás e garante bons percentuais de metano. Isso é um fator positivo, principalmente para seu aproveitamento como fonte de energia.

A Tabela 1 apresenta as características das biomassas de bovinos, aves, suínos e ovelhas para a geração de biogás.

**Tabela 1 - Biomassas da pecuária e características para geração de biogás**

Tipo de biomassa	Rendimento do biogás (m <sup>3</sup> /t)	Rendimento energético (kWh/m <sup>3</sup> biogás)	Relação C/N	CH <sub>4</sub>
Bovinos	52	6,28	19	61%
Aves	230	5,8	12	56%
Suínos	57	6,53	15	63%
Ovelhas	108	5,7	18	55%

Fonte: Adaptado de Rupf (2017).

### 2.3 O aproveitamento da biomassa - biogás

O aproveitamento da biomassa como fonte de energia renovável é considerado uma proposta sustentável para atender a demanda de energia e para reduzir a liberação de gases de efeito estufa. Além disso, o seu aproveitamento pode gerar benefício financeiro minimizando a quantidade de resíduos depositados no meio ambiente (BEKCHANOV *et al.*, 2019).

O biogás também pode substituir o gás natural nas mesmas aplicações, (aquecimento, geração de eletricidade) e, se for purificado, pode ser utilizado como biocombustível para veículos automotores. Além de apresentar características semelhantes ao gás natural, o biogás traz menor impacto ao meio ambiente. O biogás tem sido amplamente utilizado como combustível veicular tornando-se comum o uso em ônibus de transporte público nas cidades (KHAN *et al.*, 2014; NEVZOROVA; KUTCHEROV, 2019).

A composição final do biogás pode variar, pois depende, essencialmente, da fonte de matéria orgânica e do processo de digestão anaeróbia. Assim, torna-se necessário realizar a separação dos gases, isolar o metano e realizar um processo de purificação para remoção dos contaminantes, isto irá contribuir para aumentar o poder calorífico do biogás (JOPPERT *et al.* 2018).

A concentração básica de gases que estão presentes no biogás fica entre 50% a 80% de metano (CH<sub>4</sub>), 20% a 40% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), 1% a 3% de hidrogênio (H<sub>2</sub>), 0,3% a 0,5% de nitrogênio (N<sub>2</sub>) e 1% a 5% de gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), além de outros gases em menor quantidade (RISCADO; SOUSA; FERRONATO, 2018).

Segundo Thummes, Kämpfer e Jäckel (2007), o processo de funcionamento de uma planta biodigestora pode ser dividido em quatro etapas:

- a) Gestão da biomassa;
- b) Alimentação do biodigestor;
- c) Geração do biogás;
- d) Utilização do biogás.

As etapas do processo da biodigestão anaeróbia são dependentes e sequenciais e se inicia no recebimento da biomassa. A escolha do biodigestor e demais equipamentos dependem da biomassa que será utilizada como matéria-prima para geração do biogás.

Os dois produtos finais que surgem da conversão da biomassa são a energia elétrica/calor ou biocombustível. Em ambas as aplicações é preciso observar as características de: teor de umidade (intrínseca e extrínseca); poder calorífico; relação celulose/lignina; proporção de carbono e substâncias voláteis. Essas propriedades influenciam amplamente os processos de conversão nos produtos finais (MCKENDRY, 2002).

## **2.4 O processo de biodigestão anaeróbia**

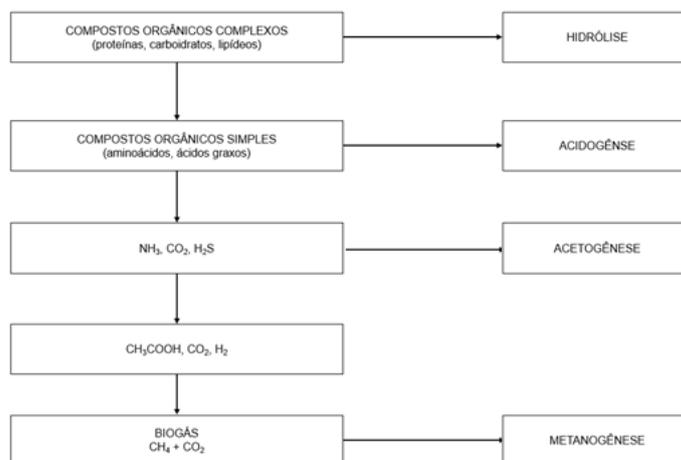
Para obtenção de biogás e do biocombustível por meio da decomposição da biomassa, são necessários processos de conversão bioquímica que fazem uso de agentes biológicos (bactérias e enzimas). A biodigestão anaeróbia é o clássico processo para realização do tratamento da biomassa via decomposição (MAHALAXMI; WILLIFORD, 2012; BRETHAUER; STUDER, 2015).

O processo de digestão anaeróbia é um fenômeno biológico de várias etapas que se torna útil na decomposição dos resíduos e geração de energia renovável. O processo passa por quatro etapas básicas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. As reações químicas ocorrem por meio de vias metabólicas naturais e através de microorganismos que atuam em um ambiente isento de oxigênio. Esses organismos auxiliam nas reações quebrando as macromoléculas orgânicas em moléculas menores e promove a geração do biogás (YADVIKA *et al.*, 2004; ZAMANI, 2015; SHARMA *et al.*, 2018).

### 2.4.1 Etapas da biodigestão anaeróbia

Segundo Zamani (2015), o processo de decomposição anaeróbia da biomassa acontece em 4 fases, conforme Figura 3, descritas a seguir.

**Figura 3 - Etapas do processo de biodigestão anaeróbia**



**Fonte: Adaptado de Rohstoffe (2006).**

#### 2.4.1.1 Hidrólise

Consiste na primeira etapa do processo de biodigestão. A biomassa, composta por polímeros orgânicos de tamanho grande (gorduras, carboidratos e proteínas), é convertida em moléculas menores (ácidos graxos, açúcares simples e aminoácidos). É importante destacar que a maioria das moléculas grandes só conseguem ser decompostas completamente na etapa da acidogênese. No entanto, na etapa de hidrólise resultam subprodutos importantes como o hidrogênio e o acetato que serão utilizados na etapa final do processo, a metanogênese (HORAN, 2018).

#### 2.4.1.2 Acidogênese

Trata-se da segunda etapa da digestão anaeróbia, na qual os microorganismos acidogênicos, também conhecidos por bactérias fermentativas, decompõem um pouco mais os produtos obtidos na fase da hidrólise. Neste estágio, ocorre a produção de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , álcoois, ácidos graxos voláteis mais leves,

ácidos carbônicos. O processo de acidogênese promove a decomposição parcial da biomassa. Assim, para obter a produção final de metano, a biomassa ainda precisa passar pelo processo de acetogênese.

#### 2.4.1.3 Acetogênese

Na terceira etapa do processo de biodigestão, microorganismos acetogênicos catabolizam os produtos da fase anterior em ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ),  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ . Os organismos acetogênicos finalizam o processo de quebra total das moléculas da biomassa facilitando a ação das arqueas metanogênicas para produzir o metano na fase subsequente.

#### 2.4.1.4 Metanogênese

A metanogênese é a última etapa da digestão anaeróbia na qual ocorre a geração do metano a partir dos principais produtos gerados na etapa da acetogênese ( $\text{CH}_3\text{COOH}$  e  $\text{CO}_2$ ), através da metanogênese acetoclástica.

### **2.5 Características importantes da biomassa**

É importante observar algumas características gerais das biomassas que influenciam no processo de obtenção de energia através de sua decomposição e, portanto, devem ser monitoradas para obter um aproveitamento eficiente deste insumo.

#### 2.5.1 Carbono fixo

A quantidade de carbono fixo presente na biomassa aumenta o seu poder calorífico durante o processo de combustão. O teor de carbono fixo de qualquer biomassa irá fornecer um valor de aquecimento aproximado do combustível que será gerado. Assim, destaca-se que os insumos com maiores teores de carbono fixo em sua composição são considerados mais adequados para a formação de combustíveis com maior potencial de queima (SADIKU; OLUYEGE; SADIKU, 2020).

### 2.5.2 Poder calorífico da biomassa

O poder calorífico da biomassa está associado ao seu teor de carbono fixo e apresenta relação direta sobre o potencial de geração de energia. O poder calorífico é uma referência clássica de avaliar as possibilidades de cada insumo para ser transformado em combustível. Representa, basicamente, o nível de aquecimento e o valor aproximado de energia que se pode esperar daquele material. A biomassa mais indicada para produção de biocombustível deve apresentar alto poder calorífico e baixo percentual de cinzas (NIRMAL *et al.*, 2011).

### 2.5.3 Percentual de cinzas

O alto teor de cinzas é uma característica indesejável para a produção de biocombustíveis reduzindo o seu poder de combustão. Além de influenciar na eficiência dos produtos gerados para a produção de energia, o percentual de cinzas também aumenta os custos com manutenção do sistema, pois cria obstruções nos dutos provocando a acúmulo de escória (DIN *et al.*, 2021b).

### 2.5.4 Sólidos voláteis

A presença de sólidos voláteis é uma característica desejável, pois afeta de forma positiva o processo de queima. O maior percentual de sólidos voláteis potencializa a ignição da biomassa, isto é, melhora o processo de combustão e possibilita a geração de um combustível com maior poder calorífico (BREWER *et al.* 2014; DIN *et al.* 2021b; HOLTMEYER *et al.* 2013).

### 2.5.5 Carbono, hidrogênio e oxigênio

O carbono é o principal constituinte da biomassa, seguido do oxigênio e do hidrogênio. Estes elementos são os principais agentes na produção de energia, portanto, são desejáveis. As proporções de carbono, hidrogênio e oxigênio presentes controlam a propriedade do combustível que será formado, assim como, possibilitam estimar o potencial de geração de energia que determinado material pode chegar (DEMIRBAS, 2008).

### 2.5.6 Nitrogênio e enxofre - N<sub>2</sub> e S

Baixos teores de nitrogênio e enxofre são características desejáveis, pois tornam a biomassa mais favorável ao meio ambiente, reduzindo a incidência de chuvas-ácidas e a formação de gases de efeito estufa (TAO *et al.* 2012).

Além disso, o percentual de enxofre presente deve ser monitorado, pois este elemento pode ser convertido em sulfeto de hidrogênio ou gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), que é altamente tóxico e poluente. Destacando, ainda, que as bactérias responsáveis pela geração do metano (metanogênicas) sofrem influência de concentrações de H<sub>2</sub>S superiores a 20.000 ppm (MAINIER; ROCHA, 2003).

### 2.5.7 Amônia - NH<sub>3</sub>

A amônia é encontrada na decomposição de algumas biomassas, sendo que concentrações acima de 450 ppm presentes no biogás comprometem a sua qualidade, inviabilizando a sua utilização. Em altas concentrações, este gás pode inibir o processo de biodigestão. Alta concentração de amônia provoca corrosão em motores e equipamentos e reduz a vida útil do biodigestor (STRIK; DOMNANOVICH; HOLUBAR, 2006).

## 2.6 Biodigestor

A alternativa clássica de tratamento de biomassa é o uso do biodigestor em um processo de digestão anaeróbica. Este tratamento é o mais indicado, pois retira a carga orgânica poluente da biomassa de forma eficiente, deixando-a totalmente inerte além de produzir o biogás simultaneamente. O uso deste processo pode atender total ou parcialmente as demandas energéticas da indústria e da pecuária e, também, consegue gerar valiosos subprodutos que podem ser aproveitados e reduzir significativamente os custos operacionais do sistema biodigestor (NEVZOROVA; KUTCHEROV, 2019).

Existem outras formas de tratar a biomassa, no entanto são menos eficientes que a digestão anaeróbica, pois é comum ocorrer a liberação de líquidos tóxicos que atingem o solo e lençol freático. As usinas de biogás podem reciclar resíduos sem causar contaminação (CLEMENS *et al.* 2018).

A seleção do biodigestor é a etapa final da implantação de um sistema de tratamento de biomassa. O sucesso de um projeto de instalação de biodigestor depende de sua resposta a vários fatores, incluindo condições climáticas, qualidade e quantidade do substrato que será capaz de suportar, disponibilidade de construção, geotecnia, mão de obra especializada e padronização (MATHERI *et al.*, 2018a).

Para instalação de um biodigestor, vários fatores precisam ser observados, incluindo a análise dos diferentes modelos e suas características, a resistência às condições climáticas do local, parâmetros como: taxa de entrada e saída de carga orgânica; teor de matéria seca da biomassa; condições de temperatura interna (entre 30 e 55 °C); tipo de alimentação (contínua, descontínua ou múltipla); tipos de substrato; rendimento de biogás e nível de tecnologia empregado (MATHERI *et al.*, 2018b; WANG; SUN; WU, 2019).

A incorporação de todos esses fatores e especificidades torna complexa a decisão sobre a escolha do tipo de biodigestor. Fica claro, portanto, que a geração de biogás e sua utilização no fornecimento de energia depende diretamente das características de cada sistema biodigestor (SIDDIQUI *et al.*, 2022).

### 2.6.1 Tipos de biodigestores e características

A Tabela 2 apresenta os tipos de biodigestores usuais e algumas de suas características que são importantes para o processo de biodigestão e para o projeto, considerando sua relação com os parâmetros de: TRH (Tempo de Retenção Hídrica da biomassa, isto é, o tempo médio para que ela se decomponha dentro do sistema biodigestor); a qualidade do biogás gerado; o nível de tecnologia empregada no sistema e a biomassa de referência utilizada.

**Tabela 2 - Tipos de biodigestores e características**

Biodigestor	TRH (dias)	Biogás	Tecnologia	Biomassa	Ref.
Pug flow	20-40	pobre	baixa	estrume	
UASB	0,5 a 2	bom	alta	líquidas	Werner (1989) e Lfu (2007)
Fixed dome	1 a 20	bom	alta	agricultura	
Floating drum	1 a 30	bom	alta	agricultura	
Batch	20-30	bom	média	agricultura	

**Fonte: Werner, Stohr e Hess (1989) e Lfu (2007).**

## 2.7 Métodos multicritérios utilizados

Os métodos multicritérios permitem a avaliação de várias alternativas (muitas vezes conflitantes) e fornece diferentes possibilidades de solução do problema, levando em consideração os critérios definidos pelo decisor. Por meio da relação matemática entre critérios e alternativas, torna-se possível chegar a uma classificação das respostas, desde a mais preferida até a menos preferida (LIOU; TZENG, 2012; HARSONO; GRUNDMANN; SOEBRINTO, 2014; WANG *et al.*, 2021).

### 2.7.1 Analytic Hierarchy Process - AHP

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), consiste em um protocolo de tomada de decisão que separa o problema com base na hierarquia. Permite fracionar uma situação complexa em partes menores, auxiliando o decisor a organizar a tomada de decisão (SAATY, 1987).

A avaliação de cada critério baseia-se na resposta de um questionário (Tabela 3) de comparação par a par entre os critérios. Esta análise ocorre por meio de uma escala gradual com valores de 1 a 9 (escala de Saaty), considerando que o valor igual a 1 significa que os critérios têm a mesma importância e o valor igual a 9 seria a importância absoluta de um critério sobre o outro, respeitando a relação recíproca de um inteiro  $n$  é igual a  $1/n$  (WIND; SAATY, 1980).

**Tabela 3 - Escala de Saaty**

Valor	Termo Linguístico
1	Igual importância
2	Igual importância ou moderada
3	moderada
4	Entre moderada importância e forte
5	Forte importância
6	Entre forte e muito forte importância
7	Muito forte importância
8	Entre muito forte e extrema importância
9	Extrema importância

**Fonte: Saaty (1987).**

As comparações, par a par dos critérios, formam a matriz de decisão (análoga

à Tabela 4) e, a partir dela, realizam-se iterações até que o valor dos pesos dos critérios seja encontrado.

**Tabela 4 - Estrutura genérica padrão de qualquer matriz de decisão**

C1	C2	...	Cn
A1	X11	...	X1n
A2	X12	...	X2n
A <sub>m</sub>	X <sub>m1</sub>	...	X <sub>bmn</sub>

**Fonte: Saaty (1987).**

A partir da resposta do questionário, obtém-se uma matriz de comparação pareada dos critérios, ou seja, se o valor de  $a_{ij} > 0$  tem-se  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ .

O vetor principal, utilizando o procedimento *Mean of Normalized Value* (MNV), e a verificação da consistência dos julgamentos, são calculados como:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$$CI = \frac{(\lambda_{\text{máx}} - n)}{(n - 1)}$$

Em que:

CR: razão de consistência;

CI: índice de consistência;

RI: índice randômico;

$\lambda_{\text{máx}}$ : maior auto vetor;

n: índice da matriz.

Para que as comparações sejam consideradas consistentes, o valor de CR deverá ser menor que 0,1.

Em problemas nos quais os critérios possuem uma relação compensatória, ou seja, alguns deles podem ser minimizados enquanto outros maximizados, torna-se

necessário estabelecer uma relação de importância entre eles, assim sendo, o método AHP é ideal para solucionar esta situação (PAUER *et al.*, 2020).

### 2.7.2 Método *Fuzzy*

O método *Fuzzy* é aplicado utilizando as variáveis linguísticas que permitem ao decisor avaliar as alternativas e os critérios por meio de uma escala de valores. Assim, torna-se possível estimar valores de critérios ou alternativas que possuem natureza qualitativa ou que, de outra forma, não poderiam ser quantificados. Já o método Topsis, permite uma hierarquização das respostas através da ordenação das alternativas (CHEN, 2000; TSAURA; CHANG; YEN, 2002).

### 2.7.3 Método Topsis

O método TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) tem a finalidade de auxiliar o decisor a selecionar a melhor alternativa em situações nas quais tem-se um número finito de critérios. Entre as várias aplicações, este método apresenta resultados eficientes ao resolver problemas das áreas de engenharia, sistemas produtivos e gestão energética (BEHZADIAN *et al.* 2012).

O método consiste em definir as soluções ideais e anti-ideais. A solução ideal é aquela que maximiza os critérios de benefício e minimiza os critérios de custo, enquanto a solução anti-ideal maximiza os critérios de custo e minimiza os critérios de benefício (HWANG; YOON, 1981).

Aplicado em situações que buscam encontrar a solução que seja mais próxima da ideal, o método Topsis permite chegar a uma ordenação entre as demais alternativas de respostas (KABIR; HASIN, 2013).

### 2.7.4 Método *Fuzzy*-Topsis

O método *Fuzzy*-Topsis trata da aplicação dos conceitos de números *Fuzzy* (incerteza por meio de intervalos de julgamento) ao método TOPSIS, que é um método de agregação compensatório baseado no conceito de distância geométrica entre uma alternativa e as soluções ideal e anti-ideal (CHEN, 2000).

Chen (2000) fornece uma abordagem metodológica para estender o método

Topsis à aplicação *Fuzzy*. Este método é ideal para resolver problemas de tomada de decisão em grupo sob a ótica *Fuzzy* (BUCKLEY, 1985; TANG *et al.*, 2004; ZADEH, 2014; CHEN, 2015). As definições a seguir são breves considerações sobre o método *Fuzzy*, conforme a proposição de Chen (2000).

**Definição 1.** Um conjunto *Fuzzy*  $\tilde{A}$  em um universo  $X$  é caracterizado pela função de associação  $\mu_{\tilde{A}}(x)$ , que associa cada elemento  $x$  a um número real  $X$  no intervalo  $[0; 1]$ . O valor da função  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  é chamado de grau de pertencimento de  $x$  em  $\tilde{A}$ .

**Definição 2.** Um conjunto *Fuzzy*  $\tilde{A}$  em um universo  $X$  é convexo se, e somente se, todo  $x_1; x_2$  pertencer a  $X$ , assim definido por:

$$\mu_{\tilde{A}}(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \text{Min}(\mu_{\tilde{A}}(x_1), \mu_{\tilde{A}}(x_2))$$

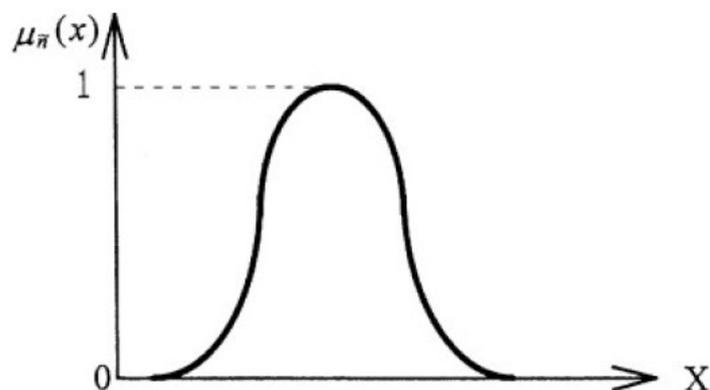
Em que:  $\lambda \in [0,1]$

**Definição 3.** Um conjunto *Fuzzy*  $\tilde{A}$  em um universo  $X$  é chamado conjunto normal *Fuzzy*, implicando a relação:

$$\exists x_1 \in X, \mu_{\tilde{A}}(x_1) = 1.$$

**Definição 4.** Um número *Fuzzy* é um subconjunto *Fuzzy* no universo, tanto convexo quanto normal e o Gráfico 1 apresenta um número *Fuzzy*  $\tilde{n}$  no universo  $X$  nesta condição.

Gráfico 1 - Número Fuzzy  $\tilde{n}$



Fonte: Chen (2000).

**Definição 5.** A  $\alpha$  - cut de um número Fuzzy  $\tilde{n}$  é definido como:

$$\tilde{n}^\alpha = \{x_i : \mu(x_i) \geq \alpha, x_i \in X\}$$

Em que  $\alpha \in [0,1]$ .

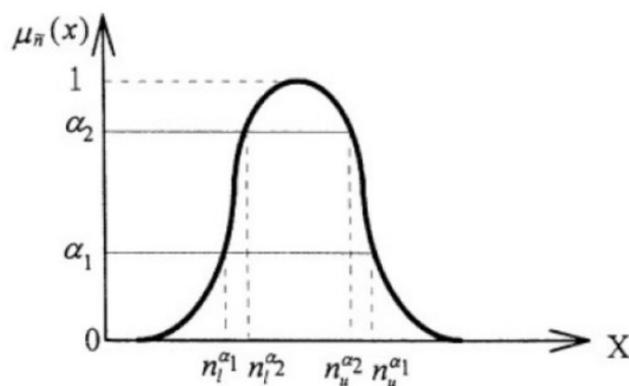
O  $\tilde{n}^{\alpha_1}$  é um intervalo não vazio fixado em  $X$  e pode ser denotado por  $\tilde{n}^{\alpha_1} = [n_l^{\alpha_1}, n_u^{\alpha_1}]$ ,  $n_l^{\alpha_1}$  e  $n_u^{\alpha_1}$  são os limites inferior e superior do intervalo, respectivamente.

O Gráfico 2 mostra um número Fuzzy  $\tilde{n}$  com  $\alpha$  - cut em:

$$\tilde{n}^{\alpha_1} = [n_l^{\alpha_1}, n_u^{\alpha_1}], \tilde{n}^{\alpha_2} = [n_l^{\alpha_2}, n_u^{\alpha_2}]$$

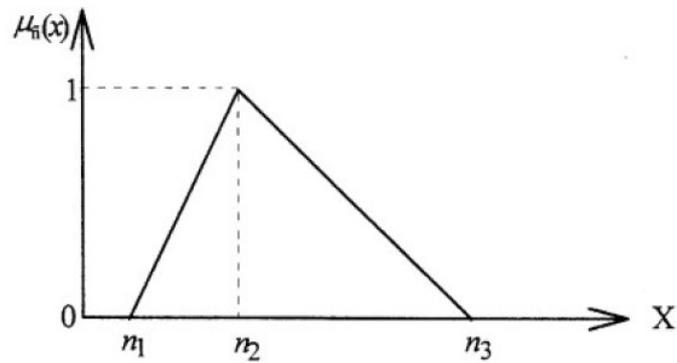
Verifica-se também que  $\alpha_2 \geq \alpha_1$  então  $n_l^{\alpha_2} \geq n_l^{\alpha_1}$  e  $n_u^{\alpha_1} \geq n_u^{\alpha_2}$ .

**Gráfico 2 - Número Fuzzy  $\tilde{n}$  com  $\alpha$ -cut**



Fonte: Chen (2000).

**Definição 6.** Um número Fuzzy triangular  $\tilde{n}$  pode ser definido pela triade  $(n_1, n_2, n_3)$  mostrada no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Número Fuzzy triangular  $\tilde{n}$ 

Fonte: Chen (2000).

A função  $\mu_{\tilde{n}}(x)$  é definida por:

$$\mu_{\tilde{n}}(x) = \begin{cases} 0 & , \quad x < n_1 \\ \frac{x - n_1}{n_2 - n_1} & , \quad n_1 \leq x \leq n_2 \\ 0 & , \quad x > n_3 \end{cases}$$

**Definição 7.**  $\tilde{n}$  é chamado de número *Fuzzy* positivo quando  $n_l^\alpha > 0$  para  $\alpha \in [0,1]$ .

Dados dois números *Fuzzy* positivos  $\tilde{m}, \tilde{n}$  e um número real positivo  $r$ ,  $\alpha$ -cut de dois números *Fuzzy* são  $\tilde{m}^\alpha = [m_l^\alpha, m_u^\alpha]$  e  $\tilde{n}^\alpha = [n_l^\alpha, n_u^\alpha]$  sendo que  $\alpha \in [0,1]$ , respectivamente. O intervalo de confiança em algumas operações principais dos números *Fuzzy*  $\tilde{m}$  e  $\tilde{n}$  podem ser expressadas como:

$$(\tilde{m} + \tilde{n})^\alpha = [m_l^\alpha + n_l^\alpha, m_u^\alpha + n_u^\alpha]$$

$$(\tilde{m} - \tilde{n})^\alpha = [m_l^\alpha - n_l^\alpha, m_u^\alpha - n_u^\alpha]$$

$$(\tilde{m} \cdot \tilde{n})^\alpha = [m_l^\alpha \cdot n_l^\alpha, m_u^\alpha \cdot n_u^\alpha]$$

$$(\tilde{m} \div \tilde{n})^\alpha = \left[ \frac{m_l^\alpha}{n_l^\alpha}, \frac{m_u^\alpha}{n_u^\alpha} \right]$$

$$(\tilde{m}^\alpha)^{-1} = \left[ \frac{1}{m_u^\alpha}, \frac{1}{m_l^\alpha} \right]$$

$$(\tilde{m} \cdot r)^x = [m_l^\alpha \cdot r, m_u^\alpha \cdot r]$$

$$(\tilde{m} \div r)^x = \left[ \frac{m_l^\alpha}{r}, \frac{m_u^\alpha}{r} \right]$$

**Definição 8.** Considerando  $\tilde{m} = (m_1, m_2, m_3)$  e  $\tilde{n} = (n_1, n_2, n_3)$  sendo dois números *Fuzzy* triangulares. Se  $\tilde{m} = \tilde{n}$ , então  $m_1 = n_1$ ,  $m_2 = n_2$  e  $m_3 = n_3$ .

**Definição 9.** Se  $\tilde{n}$  é um número *Fuzzy* triangular e  $n_l^\alpha > 0$ ,  $n_u^\alpha \leq 1$  para  $\alpha \in [0,1]$ , então  $\tilde{n}$  é chamado número *Fuzzy* triangular positivo normalizado.

**Definição 10.**  $\tilde{D}$  é chamada de matriz *Fuzzy* se, no mínimo, uma entrada de  $\tilde{D}$  for um número *Fuzzy*.

**Definição 11.** Uma variável linguística contém valores denominados termos linguísticos, sendo que o conceito de variável linguística é muito útil para lidar com situações que são muito complexas ou que necessitem ser razoavelmente descritas em expressões quantitativas convencionais.

Por exemplo, “peso” é uma variável linguística de valor muito baixo, médio baixo, elevado, muito elevado, cujo valor pode ser representado por números *Fuzzy*.

**Definição 12.** Sejam  $\tilde{m} = (m_1, m_2, m_3)$  e  $\tilde{n} = (n_1, n_2, n_3)$  dois números *Fuzzy* triangulares, o método do vértice é definido para calcular a distância entre eles:

$$d(\tilde{m}, \tilde{n}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2]}$$

**Definição 13.** Sejam  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$  dois números *Fuzzy* triangulares, o número *Fuzzy*  $\tilde{A}$  está próximo do número *Fuzzy*  $\tilde{B}$  assim como  $d = (d(\tilde{A}, \tilde{B}))$  se aproxima de 0.

O método do vértice é eficaz e simples para calcular a distância entre dois números triangulares *Fuzzy*. Algumas propriedades importantes do método do vértice são descritas como:

**Propriedade 1.** Se  $m$  e  $n$ , ambos números reais, a distância medida  $d(\tilde{m}, \tilde{n})$  é idêntica à distância Euclidiana.

Demonstração. Suponha que  $\tilde{m} (m_1, m_2, m_3)$  e  $\tilde{n} (n_1, n_2, n_3)$  ambos são números reais, então  $m_1 = m_2 = m_3 = m$  e  $n_1 = n_2 = n_3 = n$ . E

Essa distância de  $d(\tilde{m}, \tilde{n})$  pode ser calculada como:

$$\begin{aligned} d(\tilde{m}, \tilde{n}) &= \sqrt{\frac{1}{3} [(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2]} \\ &= \sqrt{\frac{1}{3} [(m - n)^2 + (m - n)^2 + (m - n)^2]} \\ &= \sqrt{(m - n)^2} \\ &= |m - n| \end{aligned}$$

**Propriedade 2.** Dois números *Fuzzy* triangulares  $\tilde{m}$  e  $\tilde{n}$  são idênticos se, e somente se,  $d(\tilde{m}, \tilde{n}) = 0$ .

Demonstração. Sejam  $\tilde{m} = (m_1, m_2, m_3)$  e  $\tilde{n} = (n_1, n_2, n_3)$  dois números *Fuzzy* triangulares, se  $\tilde{m}$  e  $\tilde{n}$  são idênticos, então  $m_1 = n_1$ ;  $m_2 = n_2$  e  $m_3 = n_3$  assim, a distância entre  $\tilde{m}$  e  $\tilde{n}$  é calculada como:

$$d(\tilde{m}, \tilde{n}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2]}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{3} [(0)^2 + (0)^2 + (0)^2]} = 0$$

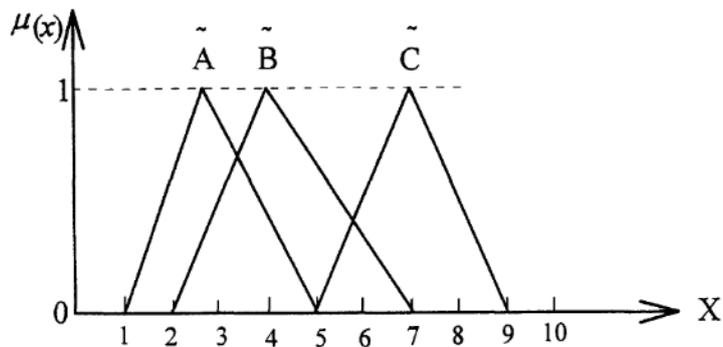
Se  $d(\tilde{m}, \tilde{n}) = 0$ , então:

$$d(\tilde{m}, \tilde{n}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2]} = 0$$

**Propriedade 3.** Sejam  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{B}$  e  $\tilde{C}$  três números Fuzzy triangulares. O número Fuzzy  $\tilde{B}$  está mais próximo do número Fuzzy  $\tilde{A}$  do que do número Fuzzy  $\tilde{C}$  se, e somente se, se  $d(\tilde{A}, \tilde{B}) < d(\tilde{A}, \tilde{C})$ .

A propriedade é trivial e, para exemplificar, o Gráfico 4 mostra três números Fuzzy  $\tilde{A} = (1, 3, 5)$ ,  $\tilde{B} = (2, 4, 7)$  e  $\tilde{C} = (5, 7, 9)$ .

**Gráfico 4 - Três números Fuzzy triangulares**



Fonte: Chen (2000).

De acordo com o método do vértice, a distância entre eles pode ser calculada como:

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(1 - 2)^2 + (3 - 4)^2 + (5 - 7)^2]} = \sqrt{2}$$

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{1}{3}[(1 - 5)^2 + (3 - 7)^2 + (5 - 9)^2]} = 4$$

Pela Definição 13, tem-se que o número *Fuzzy*  $\tilde{B}$  está mais próximo do número *Fuzzy*  $\tilde{A}$  do que do outro número *Fuzzy*  $\tilde{C}$ .

**Propriedade 4.** Seja  $\tilde{O} = (0, 0, 0)$  a origem. Se  $d(\tilde{A}, \tilde{O}) < d(\tilde{B}, \tilde{O})$ , assim, de acordo com a **Propriedade 3**, o número *Fuzzy*  $\tilde{A}$  está mais próximo da origem do que do número *Fuzzy*  $\tilde{B}$ .

### 2.7.5 Aplicação do *Fuzzy*-Topsis

A importância dos pesos dos critérios e das alternativas é avaliada pelo decisor através das variáveis qualitativas denominadas de variáveis linguísticas. Essas variáveis são expressas em números *Fuzzy* triangulares positivos para critérios e alternativas (KUO; LIANG; HUANG, 2006).

Os decisores devem utilizar as variáveis linguísticas para avaliar a importância relativa dos critérios e, em separado, proceder à análise dos critérios com relação às alternativas. Supondo que um grupo de decisão tenha  $K$  pessoas, a importância dos critérios e a classificação das alternativas pode ser calculada como:

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{K} [\tilde{x}_{ij}^1 + \tilde{x}_{ij}^2 \dots \tilde{x}_{ij}^K]$$

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{K} [\tilde{w}_j^1 + \tilde{w}_j^2 \dots \tilde{w}_j^K]$$

Em que  $\tilde{x}_{ij}^k$  e  $\tilde{w}_j^k$  são as classificações e o peso de importância dos  $K$  decisores.

Um problema de tomada de decisão em grupo multicritério difuso pode ser expresso de forma concisa em formato de matriz como:

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{11} & \dots & \tilde{x}_{11} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n]$$

Em que  $x_{ij}, \forall i, j$  e  $\tilde{w}_j, j = 1, 2, \dots, n$  são variáveis linguísticas. Estas variáveis podem ser descritas por um número *Fuzzy* triangular  $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$  e  $\tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3})$ .

Para evitar complicações, a fórmula de normalização é a mesma utilizada no Topsis clássico, a transformação de escala linear é usada aqui para transformar as várias escalas de critérios em uma escala comparável. Portanto, obtém-se a matriz de decisão difusa normalizada denotada por  $\tilde{R}$ .

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n}$$

Em que  $B$  e  $C$  são definidos como um conjunto de critérios de benefício e de custo, respectivamente como:

$$\tilde{r}_{ij} = \left( \frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right), j \in B;$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left( \frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{c_{ij}} \right), j \in C;$$

$$c_j^* = \max_i c_{ij} \text{ se } j \in B;$$

$$a_j^- = \min_i a_{ij} \text{ se } j \in C.$$

O método de normalização, mencionado anteriormente, preserva a propriedade de que os intervalos de números difusos triangulares normalizados pertencem ao intervalo  $[0; 1]$ .

Considerando a importância individual de cada critério, torna-se possível construir a matriz de decisão *Fuzzy* normalizada e ponderada da seguinte forma:

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Em que:

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \cdot \tilde{w}_{ij}$$

Após a matriz de decisão *Fuzzy* ser normalizada, conclui-se que seus elementos  $v_{ij}, \forall i, j$  são números *Fuzzy* triangulares positivos e normalizados com seu intervalo fechado  $[0; 1]$ .

Assim, torna-se possível encontrar a solução *Fuzzy* ideal (FPIS,  $A^*$ ) e a solução *Fuzzy* anti-ideal (FNIS,  $A^-$ ) como:

$$A^* = (\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^*, \dots, \tilde{v}_n^*),$$

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-),$$

Em que  $\tilde{v}_{ij}^* = (1, 1, 1)$  e  $\tilde{v}_{ij}^- = (0, 0, 0), j = 1, 2, \dots, n$ .

A distância de cada alternativa de  $A^*$  e  $A^-$  pode ser calculada como:

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, v_j^*), \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, v_j^-), \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

Em que  $d$  é a distância medida entre dois números *Fuzzy*.

O coeficiente de proximidade é definido para determinar a ordem de classificação de todas as alternativas, uma vez que  $d_i^*$  e  $d_i^-$  de cada alternativa  $A_i (i = 1, 2, \dots, m)$  podem ser calculados como:

$$CC_i = \frac{d_i^*}{d_i^* + d_i^-} \cdot i = 1, 2, \dots, m$$

Destacando que a alternativa  $A_i$  está próxima de FPIS ( $A^*$ ) e distante de FNIS ( $A^-$ ), assim como  $CC_i$  está próximo de 1.

Desta forma, em função do coeficiente de proximidade é possível determinar a classificação de todas as alternativas e selecionar a melhor delas dentre um conjunto de possibilidades.

#### 2.7.6 Aplicação de Métodos Multicritérios em estudos relacionados

Existem estudos recentes utilizando a aplicação de métodos multicritério no contexto da produção de biogás. No estudo de Moulogianni e Bournaris (2017), classificaram as regiões agroenergéticas de acordo com o potencial de geração de biomassa utilizando o método ELECTRE III. No estudo de Seabra Júnior, Colmenero e Braghini Júnior (2020), foi realizada a aplicação de AHP em conjunto com o método Topsis para selecionar biomassas da pecuária para a produção de biogás. Na mesma linha de seleção de biomassas, no estudo de Ossei-bremang e Kemausuor (2021), aplicou-se o método *Fuzzy-Topsis* como metodologia de solução para selecionar biomassas através de um rol de alternativas mais abrangente, incluindo biomassas da pecuária, resíduos sólidos urbanos e resíduos florestais. Já no estudo de Emeksiz e Yüksel (2022), observou-se a aplicação de multicritério à seleção do local apropriado para a instalação da localização de uma planta geradora de biocombustível a ser estabelecida na Turquia. Ainda, no segmento de instalação de usinas biodigestoras, no estudo de Akther *et al.* (2019), aplicou-se multicritério integrado com georreferenciamento para selecionar os locais mais adequados para instalação de um digestor para fabricar biogás na cidade de Dhaka. Já na parte de seleção do tipo de biodigestor, no estudo de Rupf *et al.* (2017), utilizou-se a aplicação de multicritério no intuito de identificar qual o melhor projeto de biodigestor levando em consideração as biomassas definidas pelo decisor, requisitos de produção de energia e de geração de biofertilizante.

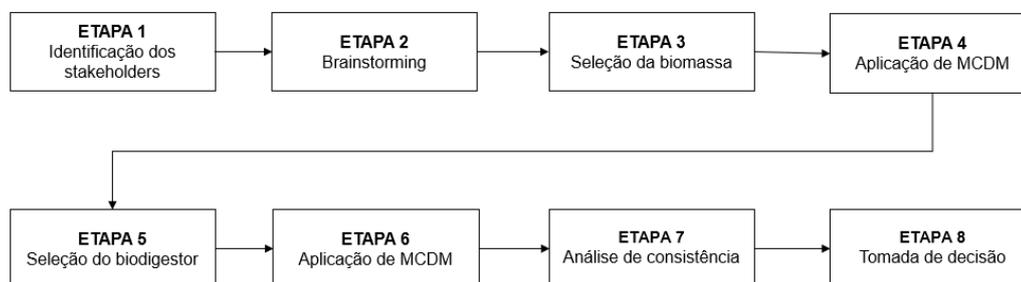
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Esta proposta pode ser aplicada nos seguintes perfis de projeto:

- a) Decisores que **não selecionaram a biomassa e nem o tipo de biodigestor.**
- b) Decisores que **já selecionaram a biomassa, mas não selecionaram o tipo de biodigestor.**
- c) Decisores que **não selecionaram a biomassa, mas já selecionaram o tipo de biodigestor.**

Para atender aos objetivos específicos definidos inicialmente neste trabalho, é preciso aplicar a sequência iterativa de etapas, conforme orientado pela Figura 4 .

**Figura 4 - Etapas de aplicação da metodologia de seleção de biomassa e de biodigestores**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

#### 3.1 Etapa 1 - identificação / definição dos stakeholders

Devido à instalação do sistema de produção de biogás se tratar de um sistema com diversas decisões complexas desde a etapa inicial (seleção da biomassa), torna-se necessário destacar os principais impactados e agentes que podem influenciar o processo decisório. Portanto, a primeira etapa de aplicação da metodologia, consiste em fixar quem são os principais *stakeholders*.

Com a finalidade de evitar erros, distorção de informações, conflitos de interesses ou sobreposição de responsabilidades que possam influenciar de forma negativa o projeto ou comprometer sua viabilidade, definiu-se como os principais

*stakeholders:*

- a) **Sponsors:** responsáveis por fixar o objetivo do projeto na etapa de *brainstorming* e ceder o capital financeiro para a implantação do sistema biodigestor;
- b) **Gestor do projeto:** responsável pela tomada de decisões. Deve levar em conta os interesses dos *sponsors* e assegurar que o objetivo do projeto seja atingido, bem como sua viabilidade.
- c) **Especialistas em biogás:** responsáveis por auxiliar o gestor do projeto no campo decisório. Participam ativamente na etapa de *brainstorming* contribuindo com informações teórico-técnicas contribuindo para definir um objetivo realista para a instalação do sistema de produção de biogás.
- d) **Responsável técnico:** responsável pelo dimensionamento do sistema. Deve garantir o perfeito funcionamento biodigestor, bem como estabelecer padrões mínimos de qualidade do biogás gerado além de observar os demais parâmetros técnicos do sistema. Deve ainda assegurar que as decisões tomadas pelo gestor sejam aplicadas no campo prático.
- e) **A equipe de execução:** responsáveis por colocar em prática as atividades de logística da biomassa, alimentação do sistema biodigestor, manutenção e limpeza do sistema, monitorar parâmetros técnicos como a qualidade do biogás, coleta de dados, etc.

### **3.2 Etapa 2 - brainstorming com especialistas**

O processo de obtenção de biogás passa, necessariamente, por duas etapas sequenciais: seleção da biomassa e tratamento anaeróbio da biomassa (biodigestor). Portanto, deve-se tratar primeiro a seleção da biomassa para que, posteriormente, seja realizado o procedimento de seleção do biodigestor.

Após a decomposição anaeróbia da biomassa dentro do sistema e da formação do biogás, torna-se possível aproveitá-lo como fonte de energia e, também, aproveitar o resíduo inerte como biofertilizante, conforme demonstrado na Figura 5.

**Figura 5 - Estrutura de funcionamento de uma planta de biogás**



Fonte: Adaptado de Seabra Júnior, Colmenero e Braghini Júnior (2021).

Para buscar um gerenciamento eficiente de todas as atividades envolvidas, desde o fornecimento da biomassa até o tratamento no biodigestor, é fundamental garantir a sustentabilidade da energia produzida e de todo o sistema que a utiliza como insumo. Assim, o objetivo desta etapa é realizar uma discussão com os especialistas em biogás acerca de dois pontos principais:

- a) Analisar as biomassas disponíveis, levantando os aspectos que impactam na produção do biogás.
- b) Analisar as opções de biodigestores disponíveis, vantagens e limitações de cada sistema para a produção de biogás.

Os especialistas devem possuir conhecimentos sólidos na parte prática de operação de biodigestores e, também, uma base acadêmica sobre as particularidades teórico-técnicas do projeto como as características, tipos, vantagens, desvantagens e limitações das biomassas; capacidade de indicar padrões de qualidade para o biogás produzido; ter conhecimento sobre principais tipos de biodigestores, assim como suas limitações; habilidade de estimar, em conjunto com o gestor, custos envolvidos no processo, como pré-tratamento da biomassa ou purificação do biogás.

Além disso, os especialistas participam da abordagem multicritério com a indicação de critérios, alternativas e no preenchimento dos questionários para calcular a relevância (pesos) de cada critério. Para analisar sobre a seleção da biomassa, sugere-se a seguinte estrutura para a definição dos especialistas:

- a) Dois especialistas (especialista 1 e especialista 2) opinando em conjunto, através do *brainstorming*, para definir as opções de biomassas mais indicadas como alternativas do problema e, também, dos critérios mais importantes para o processo.
- b) Especialista 1, de forma individual e isolada, opinando para obtenção dos pesos dos critérios, por meio da aplicação de um questionário específico para avaliar a importância de cada critério (em uma comparação par a par) e aplicação do método AHP.
- c) Especialista 2, de forma individual e isolada, figurando no papel de decisor para aplicação do método TOPSIS.

Para analisar sobre a seleção do tipo de biodigestor, sugere-se a seguinte estrutura para a definição dos especialistas:

- a) Quatro especialistas (especialista 1, especialista 2, especialista 3, especialista 4) opinando em conjunto, através do *brainstorming*, e definindo as opções de biodigestores mais indicados como alternativas do problema e, também, dos critérios mais importantes para o processo;
- b) Especialista 1, opinando para obtenção dos pesos dos critérios por meio da aplicação de um questionário específico para avaliar a importância de cada critério (em uma comparação par a par) e aplicação do método AHP;
- c) Especialista 2, especialista 3 e especialista 4 de forma individual e isolada, figurando no papel de decisores para aplicação do método Fuzzy-Topsis.

### 3.2.1 Procedimento para definição de critérios em cada caso

Para definir os critérios para seleção da biomassa e do biodigestor, é necessário realizar três procedimentos sequenciais:

- 1) Fixar o objetivo que se busca em produzir o biogás (queima, cogeração, energia elétrica, biocombustível);
- 2) Realizar levantamento na literatura sobre os principais aspectos da biomassa que influenciam no processo de produção de biogás e definir um rol geral de critérios;

- 3) Com o rol geral de critérios, deve-se consultar os especialistas em biogás e definir, entre todos os levantados, quais critérios são mais relevantes para cada tipo de projeto e, em seguida, avaliar a importância de cada critério.

Dependendo do objetivo de produzir o biogás, é possível incluir outros critérios específicos à realidade operacional de cada projeto. No entanto, antes de adicionar qualquer critério é recomendável consultar a literatura disponível sobre biogás e biomassa e verificar como este critério influencia no processo, assim como formas de quantificá-lo, para preservar a coerência do método proposto.

### **3.3 Etapa 3 - seleção da biomassa**

Esta etapa consiste em definir alternativas de biomassas, critérios importantes para o funcionamento do sistema, avaliação dos critérios e definição do método multicritério a ser aplicado.

#### **3.3.1 Definição de alternativas de biomassa**

Identifica-se um conjunto de biomassas provenientes da atividade da pecuária que serão as possibilidades de alimentação do biodigestor. Para acessar o rol de biomassas da região, sugere-se a utilização de informações referentes às quantidades de geração por animais que são catalogadas pelo órgão oficial responsável pela pecuária e agricultura da localidade (BATZIAS; SIDIRAS; SPYROU, 2005).

Segundo Feiz e Ammenberg (2017), após identificar um conjunto de biomassas é preciso investigar suas características para a produção de biogás. Portanto, antes de selecionar as alternativas faz-se necessário responder as seguintes questões:

- a) Qual a estimativa de produção de biogás da biomassa?
- b) A biomassa possui boa acessibilidade e logística para a produção de biogás?
- c) A quantidade de biogás produzida por esta biomassa é suficiente para geração de energia?

- d) O tratamento empregado na biomassa é eficiente na redução de carga orgânica?

### 3.3.2 Definição de critérios para seleção da biomassa

Após consulta bibliográfica aos estudos mencionados no Quadro 1, identificou-se três variáveis macro relacionadas à seleção da biomassa que influenciam no processo de produção do biogás: custos, variáveis físico-químicas e variáveis ligadas à utilização do biogás como fonte de energia. Os detalhes da revisão bibliográfica realizada para construção do portfólio bibliográfico encontram-se no Apêndice A.

Cada variável macro se desdobra em subcritérios (Quadro 2), entre os quais, o decisor (sob orientação dos especialistas em biogás), definirá quais deles impactam mais no projeto e que deverão ser considerados no momento da aplicação do método multicritério.

**Quadro 1 - Portfólio bibliográfico de referência quanto à definição de critérios e alternativas**

Título do estudo	Referência
Regulation of biogas production through waste water anaerobic digestion process: modeling and parameters optimization.	Mejdoub; Ksibi (2014).
Anaerobic processes.	Kasiri <i>et al.</i> (2012).
A techno-economic evaluation of anaerobic biogas producing systems in developing countries	Morgan <i>et al.</i> (2018).
Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico.	Valdez-Vazquez; Acevedo-Benítez; Hernández-Santiago (2010).
Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research challenges.	Appels <i>et al.</i> (2011).
Developing and validating a practical decision support tool (DST) for biomass selection on marginal land	Andersson-Sköld <i>et al.</i> (2014).
Status and potential of biogas energy from animal wastes in Turkey.	Avcioğlu; Türker, U. (2012).
Biogas from animal manure: a sustainable energy opportunity in the Canary Islands.	Ramos-Suárez <i>et al.</i> (2019).
Spatial decision support system to evaluate crop residue energy potential by anaerobic digestion.	Escalante; Castro; Rodríguez (2016).
Renewable methane: a technology evaluation by multi-criteria decision making from a European perspective.	Billig; Thraen (2017).
Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: a case study.	Li <i>et al.</i> (2012).
Methods to optimise the design and management of biomass-forbioenergy supply chains: a review.	De Meyer; Cattrysse; Rasinmäki; Van Orshoven (2014).
A spatial analysis of biogas potential from manure in Europe.	Scarlat <i>et al.</i> (2018)

Evaluating livestock manures for biogas production: a GIS based method.

Batzias; Sidiras; Spyrou (2005).

Fonte: Autoria própria (2022).

Quadro 2 - Rol exemplificativo de critérios para seleção da biomassa

Tipo de critério	Nº	Critério	Referência
<b>Custos</b>	1	Custo com a logística	Liu (2008); Scarlat (2018); Rhosthoffe (2006);
	2	Custo com pré-tratamento da biomassa	
	3	Custo com purificação do biogás	
<b>Variáveis Físico-Químicas</b>	4	COT	
	5	Relação C/N	
	6	TRH	
	7	Potencial redox - Eh	
	8	pH	
	9	Alcalinidade	
	10	Teor de água	
	11	Relação C/F	
	12	Temperatura	
	13	DBO	
	14	DQO	
	15	DBO / DQO	
<b>Variáveis ligadas à utilização do biogás</b>	16	Produção de biomassa	
	17	Capacidade energética	
	18	Potencial de produção de biogás	
	19	Produção diária de CH <sub>4</sub>	
	20	Produção total de CH <sub>4</sub>	
	21	Potencial de geração de energia elétrica	

Fonte: Autoria própria (2022).

Após consulta à literatura e aos especialistas, foram definidos os critérios que influenciam no processo de seleção de biomassas para produzir o biogás para fins energéticos.

### 3.3.2.1 Capacidade de produção de biomassa

Devido à importância da relação entre os parâmetros de **potencial de volume de geração de gás**, **capacidade energética** e **estimativa de produção anual de biomassa** no processo de obtenção do biogás, os mesmos foram considerados como critérios que devem ser maximizados.

Segundo Scarlat *et al.* (2018), tendo a informação sobre os tipos e quantidades de animais existentes e sobre a produção anual de dejetos, estima-se a capacidade produção anual de biomassa para diferentes tipos de rebanhos como:

$$DT = \sum_{t=1}^n \sum_{a=1}^k P_a^t * D_a^t$$

Em que:

DT: produção total de biomassa (t/ano);

$P_a^t$ : população de cada tipo de rebanho (cabeças);

$D_a^t$ : produção anual de dejetos por tipo de rebanho por cabeça (t/cabeça ano).

### 3.3.2.2 Potencial de biogás gerado pela biomassa

Estima-se o volume de biogás gerado ( $m^3$ /ano) com base nos dados: produção de sólido seco (por tipo de rebanho por cabeça) e produção de biogás (a partir de sólido seco por tipo de rebanho) (BATZIAS; SIDIRAS; SPYROU, 2005):

$$B = \sum_{t=1}^n \sum_{a=1}^k P_a^t * Ds_a^t * Rb_a^t * Fd_a^t$$

Em que:

B: produção total de biogás ( $m^3$ /ano);

$P_a^t$ : população de cada tipo de rebanho (cabeças);

$Ds_a^t$ : produção de sólido seco por tipo de rebanho por cabeça (t/cabeça ano);

$Rb_a^t$ : fator de rendimento do biogás a partir de sólido seco por tipo de rebanho ( $m^3$ /t de sólido seco);

$Fd_a^t$ : fator de disponibilidade.

### 3.3.2.3 Capacidade energética da biomassa

Por fim, conforme Scarlat *et al.* (2018), a capacidade energética deve ser avaliada pelo potencial de energia (MJ/ano) que cada tipo de biomassa tem a

capacidade de gerar:

$$E = B * Fe$$

Em que:

E: estimativa do potencial energético (MJ/ano);

B: produção total de biogás (m<sup>3</sup>/ano);

Fe = fator de energia da biomassa.

#### 3.3.2.4 Custo com a logística da biomassa

A logística da biomassa é a distância percorrida do biodigestor até o local onde ela será coletada. O custo logístico, por sua vez, é o valor que se gasta para realizar o procedimento de transporte deste material. Para garantir a rentabilidade, os custos precisam ser minimizados (ONGKUNARUK; PIYAKARN, 2011).

Tendo ciência que o custo logístico é fundamental para assegurar a viabilidade do projeto, define-se como um critério de importância e que deve ser minimizado na etapa de seleção da biomassa:

$$Lc = \frac{d \times n \times p}{ct}$$

Em que:

LC: custo logístico (U\$/ano);

d: distância total percorrida do biodigestor até o local de coleta da biomassa (km/ano);

n: número de viagens realizadas (biomassa total/capacidade do caminhão);

ct: média de consumo do caminhão (km/L);

P: preço do litro do diesel (U\$/L).

### 3.4 Etapa 4 - definição e aplicação do MCDM

Levando em consideração as características de caráter compensatório entre os critérios, isto é, o decisor possuir a liberdade de atribuir mais valor a um critério

específico enquanto atribui menos valor em outro e, pela necessidade de obter uma ordenação entre as biomassas, aplicou-se a combinação de métodos AHP (para definição dos pesos dos critérios) e TOPSIS (para ordenação das alternativas de biomassa).

### **3.5 Etapa 5 - seleção do biodigestor**

Esta etapa consiste em definir alternativas de biodigestores, critérios importantes relacionados ao sistema, com base em suas características técnicas para a geração de biogás e definição do método multicritério a ser aplicado.

#### **3.5.1 Definição das alternativas de biodigestor**

Para definir as alternativas de biodigestores, é necessário realizar uma consulta na literatura e fazer um levantamento sobre as opções existentes no momento de aplicação da metodologia.

Cada tipo de biodigestor possui características particulares, funcionamento e um nível de tecnologia diferente, portanto, após este levantamento sobre os tipos disponíveis e suas especificidades, deve-se consultar os especialistas em biogás para verificar a adaptabilidade de cada um diante das características inerentes do projeto, antes de definir de forma objetiva quais serão as alternativas de solução do problema.

#### **3.5.2 Definição de critérios para a seleção do biodigestor**

Para definição dos critérios, é necessário realizar um levantamento na literatura sobre as principais características que influenciam no processo de biodigestão e na produção de biogás e, em seguida, consultar os especialistas para fixar os principais critérios que se aplicam à realidade do projeto.

Após consulta bibliográfica aos estudos mencionados no Quadro 3, identificou-se cinco variáveis macro que são relacionadas à seleção do biodigestor: financeiras, técnicas, vida útil do sistema, parâmetros operacionais, aspectos sociais /ambientais .

Cada variável macro se desdobra em subcritérios que, por sua vez, formam um rol exemplificativo, conforme apresentado no Quadro 4. Deste rol, o decisor definirá quais deles serão utilizados. Os detalhes da revisão bibliográfica realizada

para construção do portfólio bibliográfico encontram-se no Apêndice A.

**Quadro 3 - Portfólio bibliográfico de referência quanto à definição de critérios para seleção de biodigestores**

<b>Título do estudo</b>	<b>Referência</b>
Development and evaluation of a fixed dome plug flow anaerobic digester.	Anjan (1988).
Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes.	Garfí <i>et al.</i> (2012).
Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester.	Bouallagui <i>et al.</i> (2003).
Installation and performance of low-cost polyethylene tube biodigesters on small-scale farms.	An <i>et al.</i> (1997).
Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters.	Lansing; Botero, Martin (2008).
Evaluating benefits of low-cost household digesters for rural Andean communities.	Garfí <i>et al.</i> (2012).
A preliminary study on biogas production from cowdung using fixed-bed digesters.	Xavier; Nand. (1990).
Performance evaluation of a family-size, rubber-balloon biogas plant under hilly conditions.	Kanwar; Guleri (1994).
Problems with biogas plants in himachal pr desh.	Singh, Vatsa e Verma (1997).
Psychrophilic anaerobic digestion of guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude.	Garfí <i>et al.</i> (2012).
Reduced hydraulic retention times in low-cost tubular digesters.	Martí-Herrero (2011).
Energy analysis of biogas production and electricity generation from small-scale agricultural digesters.	Ciotola; Lansing; Martin (2011).
Dissemination and Problems of African Biogas Technology.	Mulinda; Hu; Pan (2013).
Evaluating benefits of low-cost household digesters for rural Andean communities.	Garfí <i>et al.</i> (2012).
Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass.	McKendry, (2002).
Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making.	Wang (2009).
Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature.	Chai, Liu e Ngai (2013).
Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants.	Afgan; Carvalho (2002).
Household Biogas Digesters - A Review	Rajendran; Aslanzadeh; Taherzadeh (2012).
Waste to energy bio-digester selection and design model for the organic fraction of municipal solid waste	Njuguna Matheri (2018).

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Quadro 4 - Rol exemplificativo de critérios para seleção do biodigestor

Tipo de critério	Nº	Critério	Referências
Financeiros	1	Custo de aquisição	Matheri (2018); Rupf <i>et al.</i> (2016); Kulkarn (2021); Rajendran (2012); Guares; Lima; Oliveira (2021).
	2	Custo de manutenção	
	3	Custo de limpeza	
	4	Custo com mão de obra	
Técnicos	6	Temperatura interna do sistema	
	7	Presença de agitador no sistema	
	8	TRH	
	9	Energia do sistema	
	10	Tipo de biodigestão	
	12	Estágios do processo	
	13	Gasômetro	
	14	Volume do tanque	
	15	Alimentação / fluxo	
	16	Tipo de biomassa	
Vida útil	17	Tempo de construção	
	18	Durabilidade	
	19	Robustez	
	20	Tecnologia	
	21	Padronização	
	22	Peças de reposição	
Operacionais	23	Produção de biogás	
	24	Eficiência de produção	
	25	Segurança do sistema	
	26	Escala de produção de energia	
	27	Mão de obra disponível	
	28	Confiabilidade	
	29	Economia de tempo	
Social / Ambiental	30	Benefício ambiental	
	31	Empregabilidade local	
	32	Redução de impactos ambientais	
	33	Variação da matriz energética	

Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.6 Etapa 6 - definição e aplicação do MCDM

Na etapa de seleção do biodigestor, tem-se a relação compensatoriedade entre critérios, portanto, devido a esta característica, sugere-se a utilização do método AHP para análise dos pesos dos critérios.

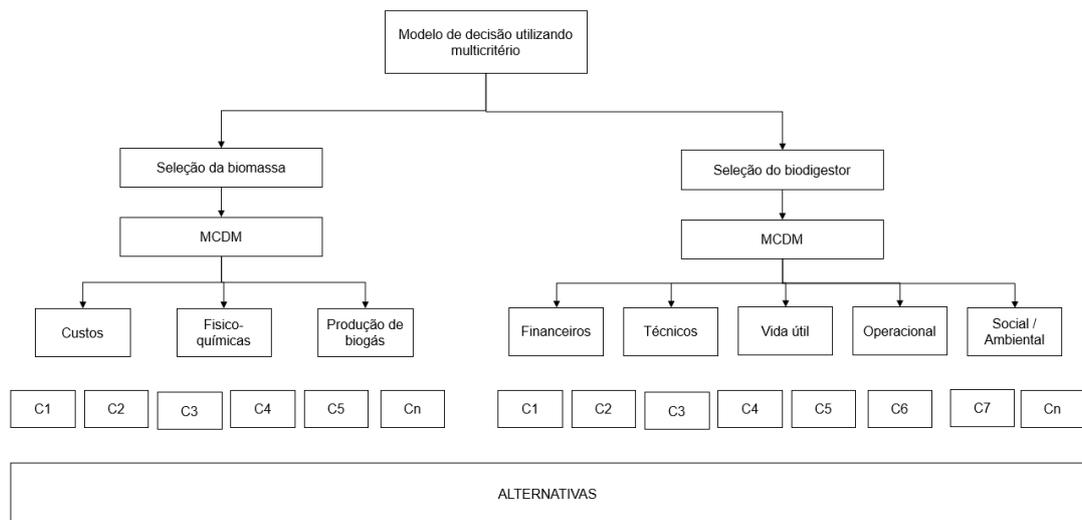
Para avaliação dos critérios de seleção do biodigestor, observa-se uma

dificuldade de mensuração de alguns critérios, sendo necessário realizar uma avaliação qualitativa. Sugere-se, portanto, utilizar como ferramenta a aproximação *Fuzzy*, devido a esta metodologia permitir realizar a avaliação por meio das variáveis linguísticas, que convertem os dados de uma análise qualitativa em valores numéricos.

Para se identificar qual é o melhor biodigestor, torna-se necessário obter uma ordenação entre o conjunto de opções analisadas, por esta razão, sugere-se a utilização do método Topsis.

A Figura 6 apresenta a construção hierárquica dos dois problemas (seleção da biomassa e seleção do biodigestor), considerando os três aspectos macro para definição de critérios para seleção da biomassa (custos, variáveis físico-químicas, variáveis para produção de biogás) e cinco aspectos macro para seleção do biodigestor (aspectos financeiros ou de custo, parâmetros técnicos, vida útil do sistema, critérios operacionais, critérios sociais / ambientais).

**Figura 6 - Estrutura hierárquica genérica para os problemas**



Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.7 Etapa 7 - análise de sensibilidade

Para verificar a consistência dos resultados obtidos, se faz necessária a aplicação da análise de sensibilidade nas respostas trazidas pela aplicação da metodologia. Essa análise tem como objetivo constatar se a aplicação do método gerou resultados sólidos ou frágeis e sua compreensão é simples: resume-se em

executar a variação dos pesos de cada critério e verificar se a ordenação inicial das alternativas se mantém ou se ela é modificada com facilidade. Caso a ordenação inicial das alternativas se modifique por uma pequena variação nos pesos dos critérios, conclui-se que o método apresentou fragilidade; caso contrário, robustez.

O método de referência utilizado para a análise de sensibilidade foi norteado pela proposta de Diaby e Goeree (2014), que propõe as alterações dos pesos em um intervalo entre 0 e 1.

Assim, quando o peso de C1, de um conjunto de critérios (C1, C2, C3, C4,...,Cn) é definido como  $W_1 = 0$ , por exemplo, os pesos dos outros critérios ( $W_2, W_3, W_4, \dots, W_n$ ) são alterados proporcionalmente como:

$$w_i = \frac{w_i}{w_i + w_{i+1} + \dots + w_{i+n}}$$

Em que:

$W_i$ : peso do critério a ser determinado;

$W_{i+1}$ : peso do próximo critério.

### **3.8 Etapa 8 - tomada de decisão**

Após aplicação do método, verificada a consistência dos resultados obtidos por meio da análise de sensibilidade, o decisor obterá a informação referente à melhor biomassa e ao melhor biodigestor para a utilização no projeto. A tomada de decisão consiste em colocar em prática a execução do projeto.

## 4 RESULTADOS

Para obtenção dos resultados, realizou-se a aplicação prática em dois cenários de estudos de caso: no primeiro deles, selecionou-se a biomassa; no segundo, o tipo de biodigestor.

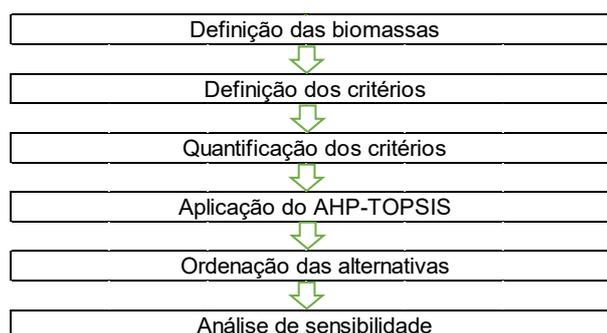
### 4.1 Seleção da biomassa

Para o pleno entendimento do contexto de aplicação, é preciso descrever, brevemente, como se deu a participação dos especialistas no primeiro cenário (seleção da biomassa), quanto à definição de alternativas, critérios e a aplicação dos métodos multicritério.

Para reforçar o embasamento, utilizou-se como alicerce o arcabouço teórico-técnico mencionado nos itens 3.3.1 (definição de alternativas de biomassa) e 3.3.2 (definição de critérios para a seleção da biomassa), do tópico de “Material e Métodos” deste trabalho, em conjunto com a opinião de dois especialistas em biogás (um pesquisador da área e um engenheiro de energias renováveis).

Para proceder à seleção da biomassa, optou-se por seguir as etapas da Figura 7.

**Figura 7 - Etapas iterativas para seleção da biomassa**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

A primeira etapa consistiu em definir as alternativas do problema. Para realizar este procedimento, utilizou-se como base da coleta de dados, as informações mais recentes sobre as quantidades de geração de biomassa da pecuária produzida nos municípios paranaenses, conforme orientado na metodologia no item 3.3.1.

As informações sobre as biomassas foram obtidas através dos dados da

Pesquisa da Pecuária Municipal, que retratam a produção de resíduos por município do estado do Paraná, fornecidos pela Tabela nº 3939, que mapeou o efetivo dos rebanhos por tipos no ano de 2020 e que foi disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

Realizou-se um recorte com os dados de interesse considerando, entre todos os municípios, aqueles que obtiveram maior quantidade de geração de cada uma das biomassas dos animais: bovinos (A1); equinos (A2); suínos (A3); ovinos (A4) e galináceos (A5), em sua localidade, conforme apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5 - Quantidade de biomassa por animais e por município no estado do Paraná**

Município / Biomassa	Número de Animais
Paranavaí (bovinos)	868.631
Guarapuava (equinos)	23.000
Toledo (suínos)	3.392.418
Guarapuava (ovinos)	62.434
Toledo (galináceos)	57.076.937

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Utilizando as alternativas de biomassas definidas anteriormente e os critérios de Capacidade de Produção de Biomassa (t/ano), buscando a maximização; Volume de Biogás (m<sup>3</sup>/ano), buscando a maximização e Capacidade Energética (MJ/ano), buscando a maximização e Custo Logístico (R\$/ano), buscando a sua minimização; montou-se a estrutura hierárquica do problema, apresentada na Figura 8.

**Figura 8 - Estrutura hierárquica do problema de seleção de biomassas, critérios e alternativas**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Para quantificar os critérios de capacidade de produção de biomassa (t/ano); potencial de geração de biogás (m<sup>3</sup>/ano) e capacidade energética de cada biomassa (MJ/ano); utilizou-se os parâmetros de produção anual de dejetos por tipo de rebanho por cabeça (t/cabeça ano); produção de sólido seco por tipo de rebanho por cabeça (t/cabeça ano); fator de rendimento do biogás a partir de sólido seco por tipo de rebanho (m<sup>3</sup>/t de sólido seco); fator de disponibilidade e fator de energia da biomassa necessários, e foram baseados no estudo de bancada realizado por Scarlat *et al.* (2018) conforme apresentado na Tabela 6.

**Tabela 6 - Parâmetros para quantificação de critérios**

<b>Animais</b>	<b>Capacidade (ton/cabeça.ano)</b>	<b>Sólido seco (ton/cabeça.ano)</b>	<b>Fator de produção (m<sup>3</sup>/ton.seco)</b>	<b>Fator D</b>	<b>Fator D (MJ/m<sup>3</sup>)</b>
Bovinos	10,8	1,54	281	0,45	
Equinos	8,82	2,6	160	0,1	
Suínos	1,89	0,21	649	0,8	21,6
Ovinos	0,64	0,22	120	0,35	
Galináceos	0,034	0,01	359	0,7	

**Fonte: Adaptado de Scarlat *et al.* (2018).**

Quantificou-se os critérios de produção total de biomassa, produção total de biogás e capacidade energética da biomassa. Os resultados individuais por quantidade de animal por município foram dispostos na Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11.

**Tabela 7 - Quantitativo de animais, estrume total, sólidos secos e rendimento do biogás por município considerando bovinos**

<b>Município</b>	<b>População (cabeças) bovinos</b>	<b>Estrume total (t/cabeça/ano)</b>	<b>Sólido seco (t/cabeça/ano)</b>	<b>Rendimento biogás (m<sup>3</sup>/t seco)</b>
		<b>Produção de estrume (t/ano)</b>	<b>Produção anual de sólido (t/ano)</b>	<b>Produção de biogás (m<sup>3</sup>/ano)</b>
Paranaíba	868.631,00	9381214,8	1.337.691,74	375.891.378,94
Guarapuava	698.580,00	7544664	1.075.813,20	302.303.509,20
Toledo	300.501,00	3245410,8	462.771,54	130.038.802,74

**Fonte: Autoria própria (2022).**

**Tabela 8 - Quantitativo de animais, estrume total, sólidos secos e rendimento do biogás por município considerando equinos**

Município	População (cabeças) equinos	Estrume total (t/cabeça/ano)	Sólido seco (t/cabeça/ano)	Rendimento biogás (m <sup>3</sup> /t seco)
		Produção de estrume (t/ano)	Produção anual de sólido (t/ano)	Produção de biogás (m <sup>3</sup> /ano)
		8,82	2,60	160,00
Paranavaí	22.839,00	201.439,98	59.381,40	9.501.024,00
Guarapuava	23.000,00	202.860,00	59.800,00	9.568.000,00
Toledo	5.411,00	47.725,02	14.068,60	2.250.976,00

Fonte: Autoria própria (2022).

**Tabela 9 - Quantitativo de animais, estrume total, sólidos secos e rendimento do biogás por município considerando suínos**

Município	População (cabeças) suínos	Estrume total (t/cabeça/ano)	Sólido seco (t/cabeça/ano)	Rendimento biogás (m <sup>3</sup> /t seco)
		Produção de estrume (t/ano)	Produção anual de sólido (t/ano)	Produção de biogás (m <sup>3</sup> /ano)
		1,89	0,22	649,00
Paranavaí	891.470,00	1.684.878,30	192.557,52	124.969.830,48
Guarapuava	721.580,00	1.363.786,20	155.861,28	101.153.970,72
Toledo	3.392.418	6.411.670,02	732.762,29	475.562.724,91

Fonte: Autoria própria (2022).

**Tabela 10 - Quantitativo de animais, estrume total, sólidos secos e rendimento do biogás por município considerando ovinos**

Município	População (cabeças) ovinos	Estrume total (t/cabeça/ano)	Sólido seco (t/cabeça/ano)	Rendimento biogás (m <sup>3</sup> /t seco)
		Produção de estrume (t/ano)	Produção anual de sólido (t/ano)	Produção de biogás (m <sup>3</sup> /ano)
		0,64	0,22	120,00
Paranavaí	28.607,00	18.308,48	6.350,75	762.090,48
Guarapuava	62.434,00	39.957,76	13.860,35	1.663.241,76
Toledo	28.037,00	17.943,68	6.224,21	746.905,68

Fonte: Autoria própria (2022).

**Tabela 11 - Quantitativo de animais, estrume total, sólidos secos e rendimento do biogás por município considerando galináceos**

Município	População (cabeças) aves	Estrume total (t/cabeça/ano)	Sólido seco (t/cabeça/ano)	Rendimento biogás (m <sup>3</sup> /t seco)
		0,03	0,01	359,00
		Produção de estrume (t/ano)	Produção anual de sólido (t/ano)	Produção de biogás (m <sup>3</sup> /ano)
Paranavaí	12.276.332,00	417.395,29	122.763,32	44.072.031,88
Guarapuava	3.339.500,00	113.543,00	33.395,00	11.988.805,00
Toledo	57.076.937	1.940.615,86	570.769,37	204.906.203,83

Fonte: Autoria própria (2022).

Para o cálculo do custo logístico, considerou-se o percurso total, a distância percorrida de ida e volta da planta biodigestora (fixada a 100 km do município de Toledo como referência) até os municípios de recolhimento da biomassa (km/ano); o número de viagens realizadas, dado pela razão entre a quantidade total de biomassa a ser recolhida e a capacidade de quatro caminhões tipo caçamba, considerando: a capacidade de um caminhão caçamba padrão de 8 toneladas por viagem; um consumo médio do caminhão carregado de 4 km/L e o preço do diesel em US\$ 1,55 (valor com referência no mês de agosto de 2022), conforme apresentado na Tabela 12.

**Tabela 12 - Detalhamento do cálculo do custo logístico por biomassa**

Animal	Nº de animais	Distância (km/ano)	Biomassa (ton/ano)	Viagens (ano)	Custo (US\$/ano)
<b>Bovinos</b>	868.631	558	9.381.215	293.163	11.757.667
<b>Equinos</b>	23.000	576	202.860	6.339	262.450
<b>Suínos</b>	3.392.418	100	6.411.670	200.365	1.440.121
<b>Ovinos</b>	62.434	576	39.958	1.249	51.695
<b>Galináceos</b>	57.076.937	100	1.940.615,86	60.644,25	435.880,51

Fonte: Autoria própria (2022).

Na etapa seguinte, após a quantificação dos critérios, iniciou-se a aplicação dos métodos multicritério.

A partir da comparação par a par dos critérios por meio da avaliação da importância relativa de cada um deles, foram obtidos os valores dos pesos com base

na avaliação do especialista 1 e aplicação do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Para realizar a comparação par a par, utilizou-se o questionário de avaliação da importância relativa dos critérios (Apêndice B), em conjunto com a aplicação do método AHP (Apêndice C), que gerou os resultados dos pesos para os critérios de: produção total de biomassa (C1); produção de biogás (C2); capacidade energética (C3) e custo logístico (C4), conforme apresentado na Tabela 13, destacando que o resultado de  $CR \leq 0,1$ , indica consistência nos valores obtidos para os pesos.

**Tabela 13 - Resultado do método AHP (Analytic Hierarchy Process )**

Critérios	C1	C2	C3	C4	CR
Pesos	0,0868	0,1239	0,0725	0,7169	0,0666

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Com as alternativas fixadas, critérios definidos, quantificados e ponderados, seguiu-se para a aplicação do método Topsis conduzido pela opinião do especialista 2, que figurou no papel de decisor.

A Tabela 14 apresenta a matriz de decisão que deu início às iterações do métodos Topsis e foi preenchida considerando as alternativas nas seguintes biomassas: bovinos (A1); equinos (A2); suínos (A3); ovinos (A4) e galináceos (A5), valores dos critérios de produção de biomassa (C1); produção de biogás (C2); capacidade energética (C3); custo logístico (C4); já quantificados.

**Tabela 14 - Matriz de decisão para início da aplicação do método Topsis**

Critérios / Alternativas	Biomassa Produção (+)	Biogás Volume (+)	Capacidade Energética (+)	Custo Logístico (-)
Bovinos	1.826.832.102	39.459.573.396	11.757.667	9.381.215
Equinos	8.438.976	182.281.882	262.450	202.860
Suínos	699.077.206	15.100.067.641	1.440.121	6.411.670
Ovinos	369.210	7.974.930	51.695	39.958
Galináceos	4.876.768	105.338.181	435.881	1.940.616

**Fonte: Autoria própria (2022).**

A aplicação do método Topsis se deu a partir da matriz de decisão,

considerando as cinco alternativas de biomassa, os quatro critérios e seus respectivos pesos (obtidos através do método AHP), conforme disposto na Tabela 15.

A partir da primeira iteração do método Topsis, realizada com os dados da Matriz de Decisão, obteve-se a matriz R, conforme disposto na Tabela 16.

**Tabela 15 - Matriz de decisão para seleção da biomassa**

Alternativas /Critérios	C1	C2	C3	C4
Pesos	0,09	0,12	0,07	0,72
A1	8,80E+13	3,34E+18	1,56E+21	1,38E+14
A2	4,12E+10	7,12E+13	3,32E+16	6,89E+10
A3	4,11E+13	4,89E+17	2,28E+20	2,07E+12
A4	1,60E+09	1,36E+11	6,36E+13	2,67E+09
A5	3,77E+12	2,38E+13	1,11E+16	1,90E+11

**Fonte: Autoria própria (2022).**

**Tabela 16 - Matriz R**

Matriz R	C1	C2	C3	C4
Pesos	0,09	0,12	0,07	0,72
A1	1,41E-07	9,55E-10	4,42E-11	1,67E-07
A2	3,05E-09	4,41E-12	2,04E-13	3,73E-09
A3	9,65E-08	3,65E-10	1,69E-11	2,05E-08
A4	6,01E-10	1,93E-13	8,93E-15	7,35E-10
A5	2,92E-08	2,55E-12	1,18E-13	6,20E-09

**Fonte: Autoria própria (2022).**

A segunda iteração do método Topsis foi realizada com base nos dados da Matriz R e na aplicação dos pesos dos critérios, resultado na matriz V, conforme Tabela 17.

**Tabela 17 - Matriz V**

Matriz V	C1	C2	C3	C4
A1	1,23E-08	1,18E-10	3,20E-12	1,20E-07
A2	2,65E-10	5,46E-13	1,48E-14	2,68E-09
A3	8,37E-09	4,53E-11	1,23E-12	1,47E-08
A4	5,22E-11	2,39E-14	6,48E-16	5,27E-10
A5	2,53E-09	3,16E-13	8,55E-15	4,45E-09

**Fonte: Autoria própria (2022).**

A partir da matriz V, calculou-se a matriz de soluções ideais (S\*) e a matriz de soluções anti-ideais (S-), conforme os dados dispostos na Tabela 18 e Tabela 19,

respectivamente.

**Tabela 18 - Matriz de Soluções ideais (S\*).**

S*	C1	C2	C3	C4
A1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,43E-14
A2	1,44E-16	1,39E-20	1,02E-23	4,62E-18
A3	1,50E-17	5,33E-21	3,91E-24	2,01E-16
A4	1,49E-16	1,40E-20	1,03E-23	0,00E+00
A5	9,44E-17	1,39E-20	1,02E-23	1,54E-17

Fonte: Autoria própria (2022).

**Tabela 19 - Matriz de Soluções anti-ideais (S-).**

S-	C1	C2	C3	C4
A1	1,49E-16	1,40E-20	1,03E-23	0,00E+00
A2	4,53E-20	2,73E-25	2,00E-28	1,37E-14
A3	6,92E-17	2,05E-21	1,50E-24	1,11E-14
A4	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,43E-14
A5	6,16E-18	8,52E-26	6,25E-29	1,33E-14

Fonte: Autoria própria (2022).

Com base no cálculo da distância entre as soluções ideais e anti-ideais, obteve-se a ordenação das alternativas, conforme demonstrado no Quadro 5.

**Quadro 5 - Resultados e ordenação das alternativas**

Alternativas	S*	S-	(S* + S-)	C*	Ranking
A1	7,13E-15	7,44E-17	7,20E-15	1,03E-02	5
A2	7,42E-17	6,87E-15	6,95E-15	9,89E-01	3
A3	1,08E-16	5,57E-15	5,68E-15	9,81E-01	4
A4	7,44E-17	7,13E-15	7,20E-15	9,90E-01	2
A5	5,49E-17	6,67E-15	6,72E-15	9,92E-01	1

Fonte: Autoria própria (2022).

Como resultado da aplicação do método Topsis, obteve-se a seguinte ordenação das alternativas: A5 > A4 > A3 > A2 > A1.

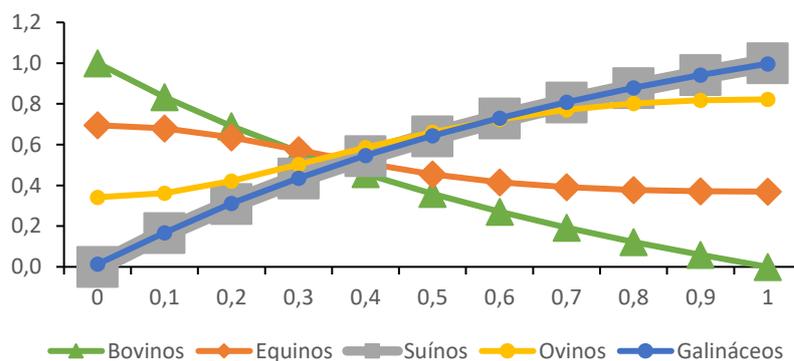
Para verificar a consistência das respostas obtidas, procedeu-se à análise de sensibilidade para cada critério e seus resultados foram apresentados no Gráfico 5, Gráfico 6, Gráfico 7 e Gráfico 8.

Na primeira etapa da análise de sensibilidade, foi verificada a consistência do critério C1 (Produção de Biomassa).

Quando:

- a) o critério C1 assumiu o valor de peso igual a 0 (zero), a ordenação das alternativas foi a seguinte:  $A1 > A2 > A3 > A4 > A5$ . Este resultado foi mantido até o critério C1 assumir o valor de peso igual a 0,3;
- b) o critério C1 assumiu o valor do peso igual a 0,3, a ordenação mudou para:  $A2 > A1 > A4 > A5 > A3$ . A variação de 30% provocou alteração na ordenação original e este resultado foi mantido até o critério C1 assumir o valor de peso igual a 0,4;
- c) critério C1 assumiu o valor do peso igual a 0,4, a ordenação das respostas mudou para:  $A4 > A5 > A3 > A2 > A1$ . A variação de 10% provocou alteração na ordenação original e este resultado foi mantido até o critério C1 assumir o valor de peso igual a 0,5;
- d) o critério C1 atingiu o valor do peso igual a 0,5 a ordenação das respostas mudou para:  $A4 > A3 > A5 > A2 > A1$ . A variação de 10% provocou alteração na ordenação original e este resultado foi mantido até o critério C1 assumir o valor de peso igual a 0,6.
- e) o critério C1 incorporou o valor do peso igual a 0,6, a ordenação das respostas mudou para:  $A5 > A3 > A4 > A2 > A1$ . A variação de 10% foi suficiente para promover alteração das alternativas. Este resultado foi mantido até o critério C1 assumir valor de peso igual a 1. A variação de 40% foi suficiente para promover a alteração das alternativas.

O Gráfico 5 mostra o comportamento das alternativas com base na variação dos pesos do critério de estimativa de produção de biomassa (C1), que exigiu uma média de 20% de modificação nos pesos para provocar alteração de ranking.

**Gráfico 5 - Análise de sensibilidade para C1 (Produção de Biomassa)**

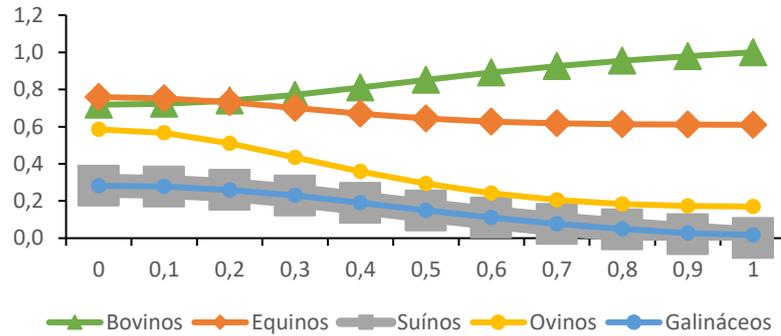
Fonte: Autoria própria (2022).

Na segunda etapa da análise de sensibilidade, foi verificada a consistência do critério C2 (Produção de Biogás).

Quando:

- o critério C2 assumiu o valor de peso igual a 0 (zero), a ordenação das alternativas foi a seguinte:  $A2 > A1 > A4 > A3 > A5$ . Este resultado foi mantido até o critério C2 assumir o valor de peso igual a 0,1;
- o critério C2 assumiu o valor do peso igual a 0,1, a ordenação mudou para  $A2 > A1 > A4 > A3 > A5$ . A variação de 10% provocou alteração na ordenação original, sendo que este resultado foi mantido até o critério C2 assumir valor igual a 1, implicando em uma variação de 90%.

O Gráfico 6 mostra o comportamento das alternativas com base na variação dos pesos do critério de estimativa de produção de biomassa (C2), que exigiu média de 50% de modificação nos pesos para provocar alteração de ranking.

**Gráfico 6 - Análise de sensibilidade para C2 (Produção de Biogás)**

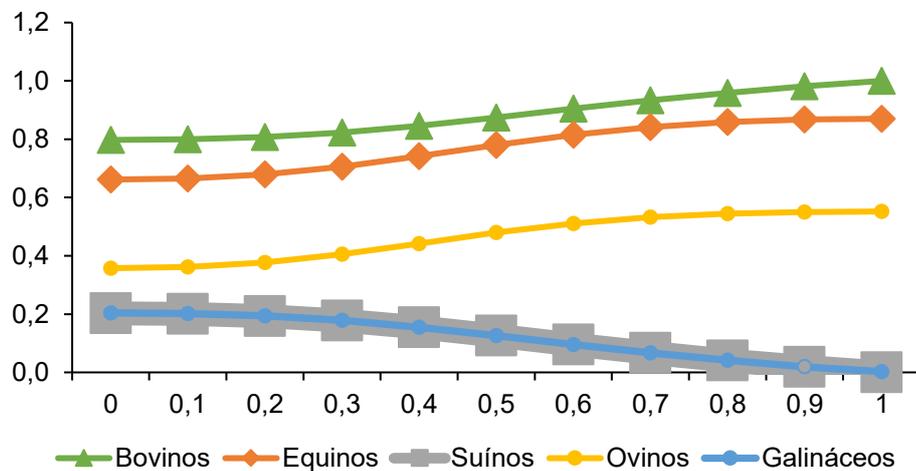
Fonte: Autoria própria (2022).

Na terceira etapa da análise de sensibilidade, foi verificada a consistência do critério C2 (Capacidade Energética).

Quando:

- a) o critério C3 assumiu o valor de peso igual a 0 (zero), a ordenação das alternativas foi a seguinte: A1 > A2 > A3 > A4 > A5. Este resultado foi mantido até o final das alterações dos pesos, quando C4 assumiu valor igual a 1 implicando em uma variação de 100% com relação ao peso obtido anteriormente.

O Gráfico 7 mostra o comportamento das alternativas com base na variação dos pesos do critério de estimativa de produção de biomassa (C3), que exigiu média de 100% de modificação nos pesos para provocar alteração de ranking.

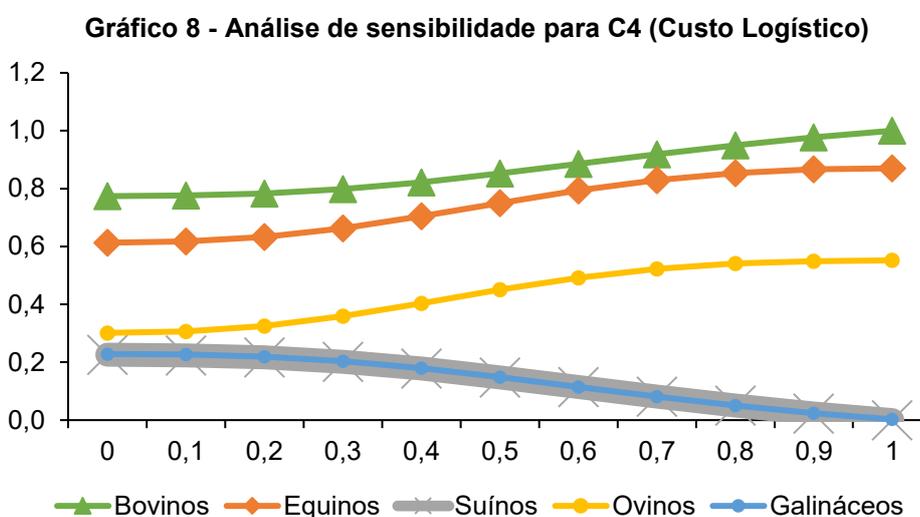
**Gráfico 7 - Análise de sensibilidade para C3 (Capacidade Energética)**

Fonte: Autoria própria (2022).

Na quarta etapa da análise de sensibilidade, foi verificada a consistência do critério C4 (Custo Logístico).

O critério C4 ao assumir o valor de peso igual a 0 (zero), a ordenação das alternativas foi a seguinte: A1 > A2 > A3 > A4 > A5. Este resultado foi mantido até o C4 assumir valor igual a 1, implicando em uma variação de 100%

O Gráfico 8 mostra o comportamento das alternativas com base na variação dos pesos do critério de estimativa de produção de biomassa (C4) e, mesmo 100% de modificação, não foi suficiente para provocar alteração de ranking.

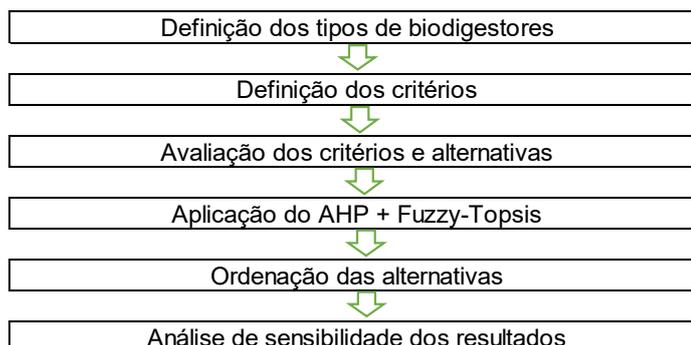


Fonte: Autoria própria (2022).

## 4.2 Seleção do biodigestor

No segundo cenário (seleção do tipo de biodigestor), de forma análoga ao procedimento para selecionar a biomassa, para definir as alternativas e critérios do problema, utilizou-se as referências teóricas mencionadas nos itens 3.5.1 (definição das alternativas de biodigestor) e 3.5.2 (definição de critérios para seleção do biodigestor) do tópico de “Material e Métodos” deste trabalho, valendo-se da opinião de quatro especialistas em biogás (um pesquisador, um engenheiro de energias renováveis, um acadêmico e um consultor em biogás e biomassa).

Para proceder à seleção do biodigestor, seguiu-se as etapas da Figura 9.

**Figura 9 - Etapas iterativas para seleção do biodigestor**

**Fonte: Autoria própria (2022).**

A primeira etapa consistiu em definir as alternativas do problema e, até o momento desta aplicação, de acordo com Matheri *et al.* (2018), Vasco-Correa *et al.* (2018) e Kulkarni *et al.* (2021) os principais tipos de biodigestores encontrados na literatura são:

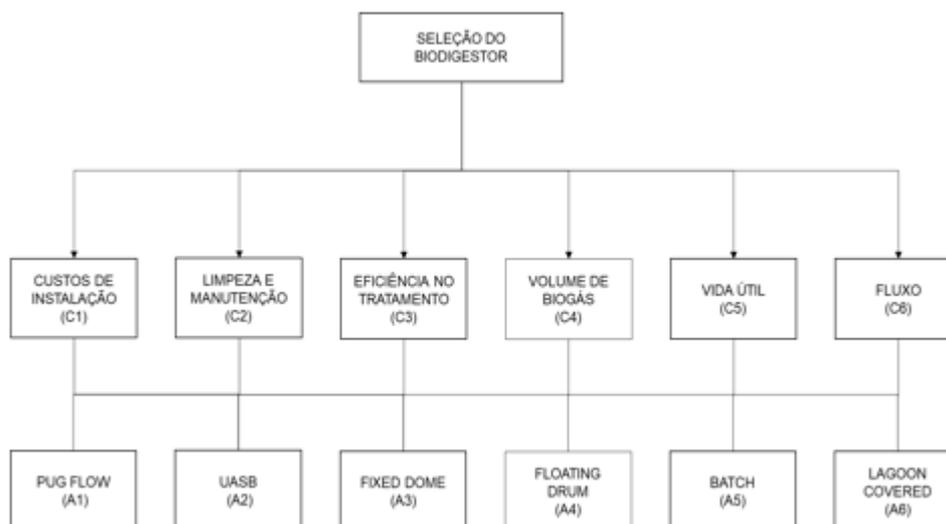
- a) Biodigestor pug flow
- b) Biodigestor UASB;
- c) Biodigestor fixed dome;
- d) Biodigestor floating drum;
- e) Biodigestor batelada / batch

Definiu-se, portanto, como alternativas de solução do problema os seguintes tipos: Pug flow (A1); UASB (A2); Fixed dome (A3); Floating drum (A4); Batch (A5); Lagoon covered (A6).

A segunda etapa consistiu em definir os critérios. Para realizar este procedimento, utilizou-se como base as características de cada biodigestor, sua importância para o processo de produção de biogás e definiu-se como critérios os seguintes parâmetros: custos de instalação (C1), buscando a minimização; limpeza e manutenção (C2), buscando a minimização; eficiência do tratamento (C3), buscando a maximização; volume de biogás (C4), buscando a maximização; vida útil (C5) buscando a maximização; fluxo de alimentação (C6), buscando a maximização.

A Figura 10 fornece a estrutura hierárquica do problema.

**Figura 10 - Estrutura hierárquica do problema de seleção do biodigestor, alternativas e critérios**



Fonte: Autoria própria (2022).

A etapa seguinte consistiu em avaliar os critérios por meio das variáveis linguísticas e estes resultados estão apresentados no Apêndice E.

A Tabela 20 apresenta a matriz de critérios avaliados por três especialistas (especialista 1, 2 e 3) com a aplicação das variáveis linguísticas pelos decisores na linguagem *Fuzzy* triangular, e a Tabela 21 fornece a agregação dos valores dos pesos. A avaliação dos critérios e alternativas por meio das variáveis linguísticas estão apresentadas no Apêndice E.

**Tabela 20 - Critérios avaliados pelas variáveis linguísticas traduzidos em números Fuzzy triangulares**

Critérios	Decisor 1			Decisor 2			Decisor 3		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
C1	0,9	1,0	1,0	0,9	1	1	0,7	0,9	1
C2	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,7	0,9	1
C3	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
C4	0,9	1,0	1	0,9	1	1	0,9	1	1
C5	0,9	1,0	1	0,9	1	1	0,9	1	1
C6	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9

Fonte: Autoria própria (2022).

**Tabela 21 - Agregação dos pesos dos critérios**

Critérios	a	b	c
C1	0,83	0,97	1,00
C2	0,63	0,83	0,97
C3	0,10	0,30	0,50
C4	0,90	1,00	1,00
C5	0,90	1,00	1,00
C6	0,50	0,70	0,90

Fonte: Autoria própria (2022).

Os resultados da avaliação da matriz de decisão com as alternativas realizadas pelos três especialistas (especialista 1, 2 e 3) com a aplicação das variáveis linguísticas pelos decisores na linguagem Fuzzy triangular, estão no Apêndice F.

Para analisar a importância de cada critério em uma comparação par a par, utilizou-se o questionário de avaliação da importância relativa (Apêndice B) em conjunto com a aplicação do método AHP, que gerou os resultados dos pesos para os critérios de: custos de instalação (C1); limpeza e manutenção (C2); eficiência no tratamento (C3); volume de biogás (C4); vida útil (C5); alimentação (C6), conforme apresentado na Tabela 22.

**Tabela 22 - Resultado da aplicação do Método AHP (Analytic Hierarchy Process)**

Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Pesos	0,62293	0,19381	0,05304	0,04250	0,04106	0,04667

\* CR = 0,07223; CR <= 0,1, indica consistência nos valores obtidos para os pesos.

Fonte: Autoria própria (2022).

Em seguida, aplicando-se as iterações do método Topsis, obteve-se os resultados da distância entre cada alternativa e as soluções ideais e anti-ideais, Tabela 23 e 24, respectivamente.

**Tabela 23 - Dados para soluções anti-ideais**

Dij*	C1	C2	C3	C4	C5	C6	d*
A1	0,729	0,468	0,834	0,723	0,110	0,781	3,645
A2	0,729	0,606	0,781	0,539	0,110	0,654	3,418
A3	0,554	0,468	0,741	0,366	0,110	0,654	2,893
A4	0,877	0,267	0,723	0,366	0,723	0,535	3,491
A5	0,877	0,267	0,741	0,221	0,876	0,535	3,517

A6	0,389	0,468	0,781	0,221	0,221	0,654	2,735
----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

**Fonte: Autoria própria (2022).**

**Tabela 24 - Dados para soluções anti-ideais**

Dij-	C1	C2	C3	C4	C5	C6	d-
A1	0,337	0,632	0,834	0,341	0,941	0,288	3,373
A2	0,337	0,472	0,781	0,521	0,941	0,425	3,476
A3	0,512	0,632	0,741	0,708	0,941	0,425	3,958
A4	0,182	0,807	0,723	0,708	0,341	0,565	3,326
A5	0,182	0,807	0,741	0,858	0,183	0,565	3,336
A6	0,693	0,632	0,781	0,858	0,858	0,425	4,246

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Por fim, com base no cálculo da distância entre as soluções ideais e anti-ideais e aplicação dos pesos do método AHP, obteve-se a ordenação das alternativas, conforme demonstrado na Tabela 25.

**Tabela 25 - Ordenação das alternativas**

Biodigestores	Alternativas	(d-) + (d*)	Q	Ordem
Pug flow	A1	1,13	2,55	4
Uasb	A2	1,13	2,67	3
Fixed dome	A3	1,12	1,96	5
Floating drum	A4	1,15	3,04	1
Batch	A5	1,15	3,04	2
Lagoon covered	A6	1,12	1,63	6

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Como resultado da aplicação do método AHP e *Fuzzy-Topsis*, obteve-se a seguinte ordenação das alternativas:  $A4 > A5 > A2 > A1 > A3 > A6$ .

Para verificar a consistência das respostas obtidas, procedeu-se à análise de sensibilidade para cada critério e seus resultados foram apresentados no Gráfico 9, Gráfico 10, Gráfico 11 Gráfico 12, Gráfico 13 e Gráfico 14.

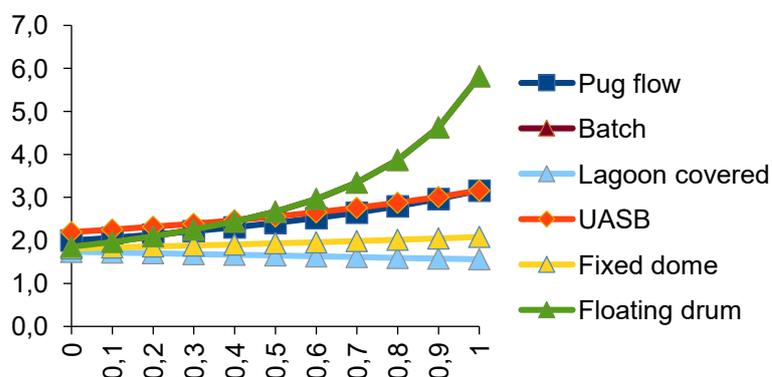
Na primeira etapa da análise de sensibilidade, foi verificada a consistência do critério C1 (Custos de Instalação), que obteve o valor de peso original igual a 0,62293.

Quando:

- a) o critério C1 assumiu o valor de peso igual a 0 (zero), propiciou a seguinte ordenação das alternativas:  $A2 > A1 > A5 > A4 > A3 > A6$ . Este resultado se manteve até o critério C1 assumir o valor de peso igual a 0,3.

- A variação de 30%, provocou alteração das alternativas;
- b) o critério C1 assumiu o valor do peso igual a 0,3 a ordenação das alternativas mudou para:  $A2 > A5 > A4 > A1 > A3 > A6$ . Este resultado se manteve até o critério C1 assumir o valor de peso igual a 0,5. A variação de 40% foi suficiente para promover alteração das alternativas;
- c) o critério C1 incorporou o valor de peso igual a 0,5, houve alteração na ordenação das respostas para  $A4 > A5 > A2 > A1 > A3 > A6$ . Este resultado foi mantido até o critério C1 assumir o valor de peso igual a 1. A variação de 50% foi suficiente para promover uma alteração das alternativas;
- d) o critério C1 assumiu valor igual a 1, houve uma mudança da ordenação para:  $A5 > A4 > A1 > A2 > A3 > A6$ . A média de 40% de modificação nos pesos foi suficiente para provocar alteração de ranking, conforme mostrado no Gráfico 9.

**Gráfico 9 - Análise de sensibilidade para C1 (Custos de Instalação)**



Fonte: Autoria própria (2022).

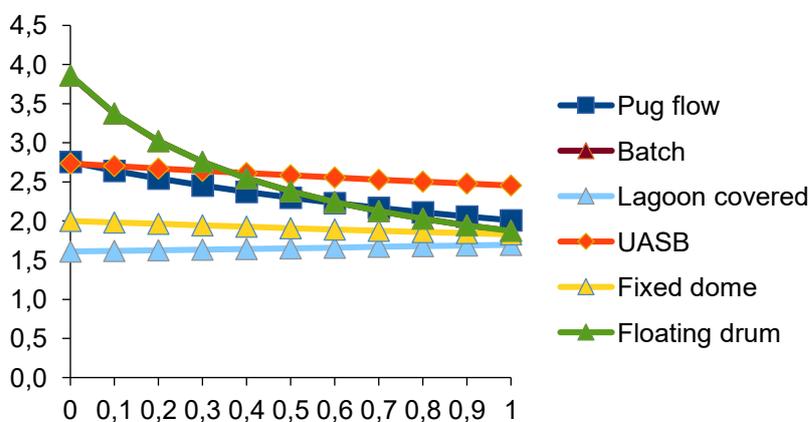
Na segunda etapa da análise de sensibilidade, foi verificada a consistência do critério C2 (Limpeza e Manutenção), que obteve o valor de peso original igual a 0,19381.

Quando:

- a) o critério C2 assumiu o valor de peso igual a 0 (zero), a ordenação das alternativas foi a seguinte:  $A4 > A5 > A1 > A2 > A3 > A6$ ;
- b) o critério C2 assumiu o valor de peso igual a 0,1, mudou a ordenação para:  $A4 > A5 > A2 > A1 > A3 > A6$ . Este resultado se manteve

- até o critério C2 assumir o valor de 0,4. A variação de 10%, foi suficiente para promover alteração das alternativas;
- c) o critério C2 assumiu o valor do peso 0,4, a ordenação mudou para: A2 > A5 > A4 > A1 > A3 > A6. Este resultado se manteve até o critério C2 assumir valor igual a 0,7. A variação de 75% foi suficiente para promover alteração das alternativas;
- d) o critério C2 assumiu o valor igual a 0,7, a ordenação mudou para: A2 > A1 > A5 > A4 > A3 > A6. Este resultado se manteve até o critério C2 assumir o valor igual a 1. A variação de 43 % foi suficiente para promover alteração das alternativas;
- e) o critério C2 assumiu o valor de peso igual a 1, houve mudança na ordenação para: A2 > A1 > A4 > A5 > A3 > A6. Em média 42,2% de modificação nos pesos foi suficiente para provocar alteração de ranking, conforme mostrado no Gráfico10.

**Gráfico 10 - Análise de sensibilidade para C2 (Limpeza e Manutenção)**



Fonte: Autoria própria (2022).

Na terceira etapa da análise de sensibilidade, foi verificada a consistência do critério C3 (Eficiência no Tratamento), que obteve o valor de peso original igual a 0,05304.

Quando:

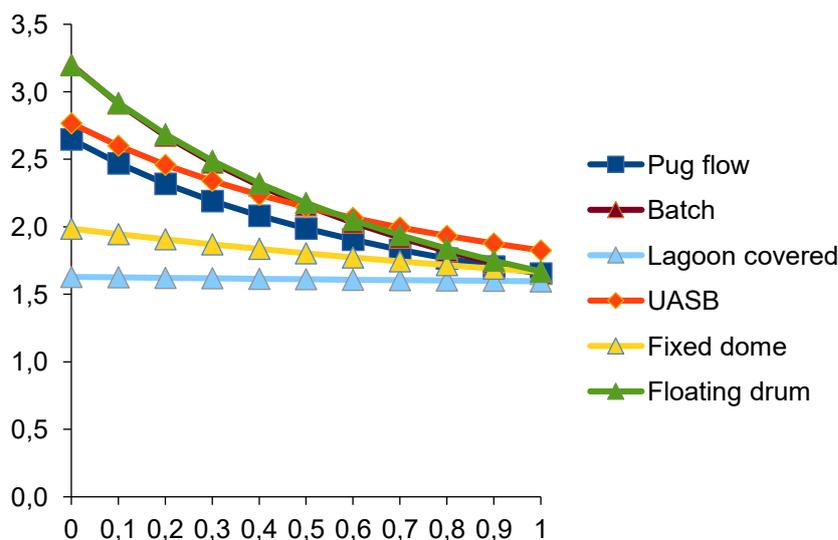
- a) o critério C3 assumiu o valor de peso igual a 0 (zero), possibilitou a ordenação das alternativas para: A5 > A4 > A2 > A1 > A3 > A6;
- b) o critério C3 assumiu o valor do peso igual a 0,1, a ordenação mudou para:

$A4 > A5 > A2 > A1 > A3 > A6$ . Este resultado se manteve até o critério C3 assumir valor igual a 0,6. A variação de 50% foi suficiente para promover alteração das alternativas;

c) o critério C3 assumiu valor de 0,6, houve alteração na ordem para:  $A2 > A4 > A5 > A1 > A3 > A6$ . Este resultado se manteve até o critério C3 assumir valor igual a 1. A variação de 40% foi suficiente para promover uma alteração das alternativas;

d) o critério C3 assumiu o valor de peso igual a 1, houve alteração na ordem para:  $A2 > A4 > A3 > A1 > A5 > A6$ . Em média 45% de modificação nos pesos foi suficiente provocar alteração de ranking, conforme mostrado no Gráfico 11.

**Gráfico 11 - Análise de sensibilidade para C3 (Eficiência no Tratamento)**



Fonte: Autoria própria (2022).

Na quarta etapa da análise de sensibilidade, foi verificada a consistência do critério C4 (Volume de Biogás), que obteve o valor de peso original igual a 0,04250.

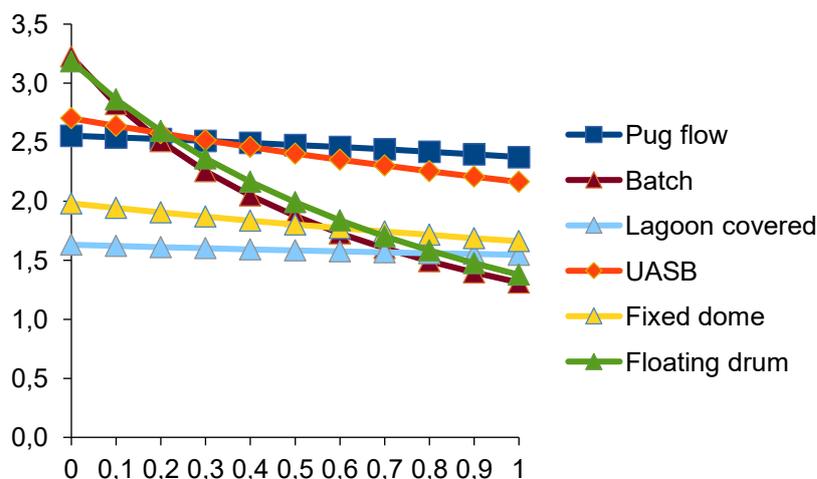
Quando:

a) o critério C4 assumiu o valor de peso igual a 0 (zero), a ordenação das alternativas foi a seguinte:  $A5 > A4 > A2 > A1 > A3 > A6$ ;

b) o critério C4 assumiu o valor do peso igual a 0,1, a ordenação mudou para:  $A4 > A5 > A2 > A1 > A3 > A6$ . Este resultado se manteve até o critério C4 assumir valor igual a 0,2. A variação de 10% foi suficiente para

- promover alteração das alternativas;
- c) o critério C4 assumiu um valor igual a 0,2, houve alteração na ordenação para:  $A4 > A2 > A1 > A5 > A3 > A6$ . Este resultado se manteve até o critério C4 assumir valor igual a 0,3. A variação de 10% foi suficiente para promover alteração das alternativas;
- d) o critério C4 obteve valor igual a 0,3, houve mudança na ordenação para:  $A2 > A1 > A4 > A5 > A3 > A6$ . Este resultado se manteve até o critério C4 assumir valor igual a 0,4. A variação de 10% foi suficiente para promover alteração das alternativas;
- e) o critério C4 assumiu um valor igual a 0,6, houve uma mudança na ordenação para:  $A1 > A2 > A4 > A3 > A5 > A6$ . Este resultado se manteve até o critério C4 assumir valor igual a 0,7. A variação de 30% foi suficiente para promover alteração das alternativas;
- f) o critério C4 assumiu o valor de 0,7, houve alteração na ordenação para:  $A1 > A2 > A3 > A4 > A5 > A6 > A7$ . Este resultado se manteve até o critério C4 assumir valor igual a 0,8. A variação de 10% foi suficiente para promover a alteração das alternativas;
- g) o critério C4 obteve um valor igual a 0,8 , houve uma mudança na ordenação para:  $A1 > A2 > A3 > A4 > A6 > A5$ . Este resultado se manteve até o critério C4 assumir valor igual a 0,9. A variação de 10% foi suficiente para promover alteração das alternativas;
- h) o critério C4 assumiu um valor de peso igual a 0,9, houve mudança na ordenação para:  $A1 > A2 > A3 > A6 > A4 > A5$ , Este resultado se manteve até o final das iterações. A variação de 10% no valor dos pesos foi suficiente para promover a alteração das alternativas. Em média 12,8% de modificação nos pesos foi suficiente provocar alteração de ranking, conforme mostrado no Gráfico 12.

**Gráfico 12 - Análise de sensibilidade para C4 (Volume de Biogás)**

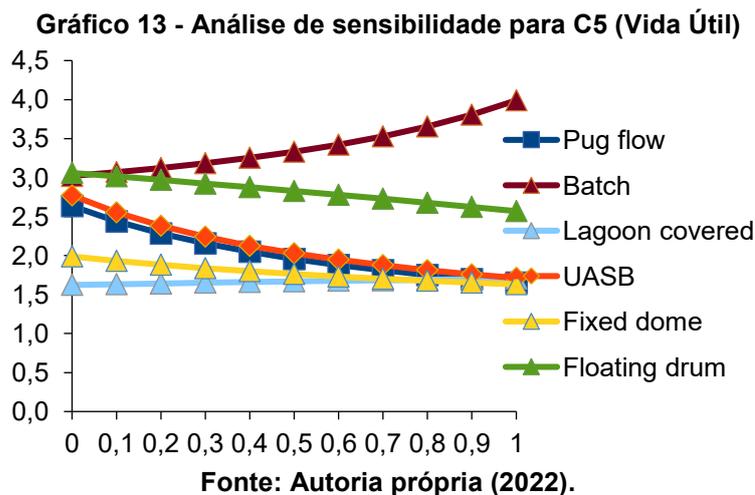


Fonte: Autoria própria (2022).

Na quinta etapa da análise de sensibilidade, foi verificada a consistência do critério C5 (Vida Útil), que obteve o valor de peso original igual a 0,04106.

Quando:

- o critério C5 assumiu o valor de peso igual a 0 (zero), a ordenação das alternativas foi a seguinte:  $A4 > A5 > A2 > A1 > A3 > A6$ ;
- o critério C5 assumiu o valor do peso igual a 0,8, a ordenação mudou para:  $A5 > A4 > A2 > A1 > A6 > A3$ . A variação de 80% foi suficiente para promover uma alteração das alternativas. Este resultado se manteve até o critério C5 assumir valor igual a 1;
- o critério C5 assumiu valor do peso igual a 1, houve mudança na ordem para:  $A5 > A4 > A2 > A6 > A1 > A3$ . Esta sequência de resultados se manteve até o final das iterações. A variação de 20% foi suficiente para promover uma alteração das alternativas. Em média 50% de modificação nos pesos foi suficiente para provocar alteração de ranking, conforme mostrado conforme mostrado no Gráfico 13.



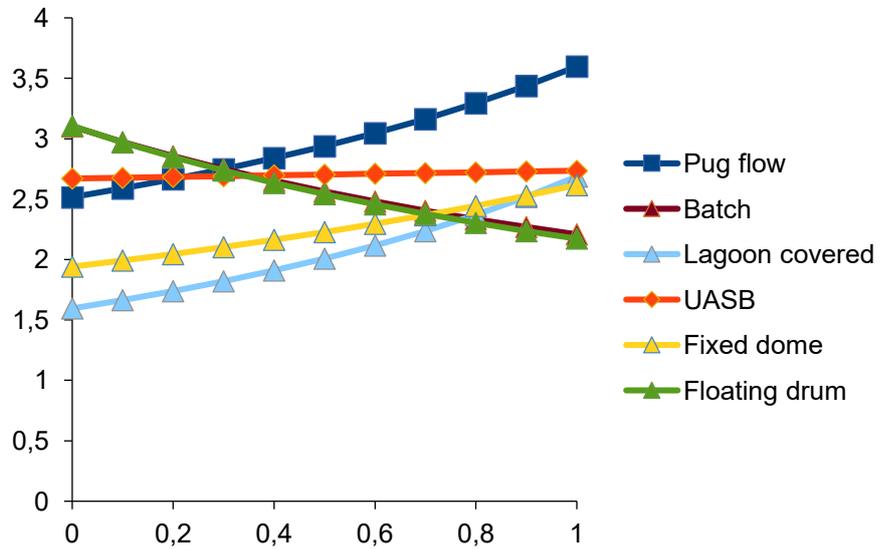
Na sexta etapa da análise de sensibilidade, foi verificada a consistência do critério C6 (Fluxo de Alimentação), que obteve o valor de peso original igual a 0,04667.

Quando:

- o critério C6 assumiu o valor de peso igual a 0 (zero), a ordenação das alternativas foi a seguinte:  $A4 > A5 > A2 > A1 > A3 > A6$ ;
- o critério C6 assumiu o valor do peso igual a 0,1, a ordenação mudou para:  $A5 > A4 > A2 > A1 > A3 > A6$ . Este resultado se manteve até o critério C6 assumir um valor igual a 0,3. A variação de 20% foi suficiente para promover alteração das alternativas;
- o critério C6 assumiu valor igual a 0,3, houve alteração na ordenação para:  $A1 > A5 > A4 > A2 > A3 > A6$ . Este resultado se manteve até o critério C6 assumir valor igual a 0,4. A variação de 10% foi suficiente para promover alteração das alternativas;
- o critério C6 assumiu valor igual a 0,4, houve mudança na ordenação para:  $A1 > A2 > A5 > A4 > A3 > A6$ . Este resultado se manteve até o critério C5 assumir valor igual a 0,8. A variação de 40% foi suficiente para promover alteração das alternativas;
- o critério C6 assumiu valor igual a 0,8, houve alteração na ordenação para:  $A1 > A2 > A3 > A6 > A5 > A4$ . Este resultado se manteve até o critério C4 assumir valor igual a 1. A variação de 20% foi suficiente para promover uma alteração das alternativas;
- o critério C6 obteve valor igual a 1, houve uma mudança na ordenação para:  $A1 > A2 > A6 > A3 > A5 > A4$ . A média de 45% de modificação

nos pesos foi suficiente para provocar alteração de ranking, conforme mostrado no Gráfico 14.

**Gráfico 14 - Análise de sensibilidade para C6 (Fluxo de Alimentação)**



Fonte: Autoria própria (2022).

## 5 DISCUSSÃO

Como visto, o processo produção do biogás depende do equacionamento de etapas que se inter-relacionam, desde a seleção da biomassa, avaliação de suas particularidades para a geração do biogás, à escolha do tipo mais adequado de biodigestor para atender às demandas do projeto.

A consideração de todos os fatores técnicos envolvidos é fundamental e torna o processo de tomada de decisão complexo, uma vez que estas variáveis precisam ser bem dimensionadas de modo a assegurar os seguintes aspectos: viabilidade financeira do projeto; atendimento das necessidades dos *stakeholders*; tratamento adequado da biomassa (promovendo redução significativa de sua carga orgânica); geração de um biogás de qualidade com possibilidades de utilização como fonte de energia renovável.

Através da metodologia proposta por este trabalho, foi possível fixar um procedimento iterativo a ser seguido pelo gestor, de modo a nortear a tomada de decisão sobre a seleção de biomassa e seleção do tipo de biodigestor de forma técnica e não empírica.

Para a seleção da biomassa, utilizou-se como pilar a estrutura macro de três tipos de critérios gerais que influenciam diretamente no processo de produção de biogás, sendo eles: custos; variáveis físico-químicas e variáveis ligadas à utilização do biogás como fonte de energia. Estes critérios gerais foram definidos segundo a bibliografia atual e com base na opinião dos especialistas e se desdobraram em um rol total de 21 subcritérios.

Para a seleção do tipo de biodigestor, utilizou-se como pilar a estrutura macro de cinco tipos de critérios gerais que influenciam diretamente no processo de escolha do tipo de biodigestor, sendo eles: aspectos financeiros; aspectos técnicos; aspectos relacionados à vida útil e durabilidade do sistema; aspectos operacionais; aspectos sociais e ambientais. Estes critérios gerais foram definidos segundo a bibliografia atual e opinião dos especialistas e se desdobraram em um rol total de 33 subcritérios.

Considerando as variáveis importantes para a seleção da biomassa e para os tipos de biodigestores e a aplicação dos métodos multicritério, obteve-se a seguinte ordenação quanto à seleção de biomassas: galináceos > ovinos > equinos > suínos > bovinos e quanto à seleção do tipo de biodigestor a seguinte ordenação: *Floating drum* > *Batch* > *Uasb* > *Pug flow* > *Fixed dome* > *Lagoon covered*.

Devido à dificuldade de mensuração direta em termos quantitativos, alguns critérios para seleção do tipo de biodigestor foram avaliados de forma qualitativa, por meio das variáveis linguísticas e, posteriormente, transformados em fatores quantitativos e interpretados através da lógica *Fuzzy* com números triangulares, ponderação através do método AHP e combinação com o método Topsis para ordenação das alternativas.

Quanto à análise de sensibilidade, dizer que o valor dos critérios é sensível significa que pequenas alterações no valor do peso original são capazes de causar sucessivas alterações na classificação original das alternativas. Neste caso, o decisor deverá ficar atento aos critérios que apresentarem este comportamento na análise de sensibilidade e considerar a possibilidade de substituí-los por outros critérios ou proceder novamente a sua avaliação pelos especialistas.

## 6 CONCLUSÃO

Foi possível concluir que os resultados obtidos em ambas as aplicações práticas da metodologia foram sólidos/robustos, pois se verificou, através da análise de sensibilidade, que para haver modificação na ordenação das alternativas obtidas originalmente como resposta da aplicação do método, foi necessária a alteração dos pesos em média (média da média por critério) 67,5% nos valores originais dos pesos dos critérios para seleção da biomassa e 39,16% para os critérios utilizados para solucionar o problema de seleção do tipo de biodigestor.

Tendo em vista os aspectos da aplicação nos dois cenários (seleção da biomassa e seleção do biodigestor), os resultados obtidos e a conferência de robustez pela análise de sensibilidade, foi possível perceber que a metodologia proposta se mostrou eficiente como referência para auxiliar os gestores na tomada de decisão.

Quanto ao ineditismo da pesquisa, foi possível verificar que este trabalho permitiu abrir caminhos para discussões mais profundas e futuras pesquisas no intuito de iniciar uma construção literária mais robusta, abordando técnicas estruturadas no processo decisório, buscando aferir caráter mais técnico e menos empírico em projetos complexos dentro da tecnologia do biogás, além de preencher uma lacuna percebida no arcabouço literário abordando o tema, sendo esta a maior contribuição teórica da pesquisa.

Do ponto de vista prático, a aplicação em dois cenários de estudo de caso demonstrou a versatilidade da metodologia, conferindo a possibilidade de replicação em diferentes contextos, desde o pequeno produtor rural até as agroindústrias.

Para finalizar, como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação de metodologia análoga em projetos ligados ao aproveitamento do biogás como fonte de energia ou para fins de monetização.

## REFERÊNCIAS

- AFGAN, N. H.; CARVALHO, M. G. Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. **Energy**, v. 27, n. 8, p. 739-755, 2002.
- AKTHER, A.; *et al.* Site suitability analysis of biogas digester plant for municipal waste using GIS and multi-criteria analysis. **Asia-Pacific Journal of Regional Science**, v. 3, n. 1, p. 61-93, 2019.
- AN, B. X. *et al.* Installation and performance of low-cost polyethylene tube biodigesters on small-scale farms. **World Animal Review**, v. 88, n. 1, p. 38-47, 1997.
- ANDERSSON-SKÖLD, Y. *et al.* Developing and validating a practical decision support tool (DST) for biomass selection on marginal land. **Journal of Environmental Management**, v. 145, p. 113-121, 2014.
- APPELS, L. *et al.* Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4295-4301, 2011.
- AVCIOĞLU, A. O.; TÜRKER, U. Status and potential of biogas energy from animal wastes in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 3, p. 1557-1561, 2012.
- BALAT, M.; BALAT, H. Biogas as a renewable energy source: a review. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v. 31, n. 14, p. 1280-1293, 2009.
- BATZIAS, F. A.; SIDIRAS, D. K.; SPYROU, E. K. Evaluating livestock manures for biogas production: A GIS based method. **Renewable Energy**, v. 30, n. 8, p. 1161-1176, 2005.
- BEHZADIAN, M.; *et al.* A state-of the-art survey of TOPSIS applications. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 17, p. 13051-13069, 2012.
- BEKCHANOV, M.; *et al.* Why adoption is slow despite promising potential of biogas technology for improving energy security and mitigating climate change in Sri Lanka? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 105, p. 378-390, 2019.
- BILLIG, E.; THRAEN, D. Renewable methane- A technology evaluation by multi-criteria decision making from a European perspective. **Energy**, v. 139, p. 468-484, 2017.
- BOUALLAGUI, H. *et al.* Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. **Bioresource Technology**, v. 86, n. 1, p. 85-89, 2003.

- BRETHAUER, S.; STUDER, M. H. Biochemical conversion processes of lignocellulosic biomass to fuels and chemicals: a review. **Chimia**, v. 69, n. 10, p. 572-581, 2015.
- BREWER, C. E.; *et al.* New approaches to measuring biochar density and porosity. **Biomass and Bioenergy**, v. 66, p. 176-185, 2014.
- BUCKLEY, J. J. Fuzzy hierarchical analysis. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 17, n. 3, p. 233-247, 1985.
- CHAI, J.; LIU, J. N. K.; NGAI, E. W. T. Application of decision-making techniques in supplier selection: a systematic review of literature. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 10, p. 3872-3885, 2013.
- CHEN, C. T. A note on "extension of Fuzzy TOPSIS method based on interval-valued Fuzzy sets". **Applied Soft Computing Journal**, v. 26, p. 513-514, 2015.
- CHEN, C. T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under Fuzzy environment. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 114, n. 1, p. 1-9, 2000.
- CIOTOLA, R. J.; LANSING, S.; MARTIN, J. F. Emergy analysis of biogas production and electricity generation from small-scale agricultural digesters. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 11, p. 1681-1691, 2011.
- CLEMENS, H.; *et al.* Africa biogas partnership program: a review of clean cooking implementation through market development in East Africa. **Energy for Sustainable Development**, v. 46, p. 23-31, 2018.
- DALENA, F.; BASILE, A.; ROSSI, C. Bioenergy systems for the future. **Bioenergy Systems for the Future**, p. i-iii, 2017.
- DE MEYER, A.; *et al.* Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 657-670, 2014.
- DEMIRBAS, A. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 8, p. 2106-2116, 2008.
- DIABY, V.; GOEREE, R. How to use multi-criteria decision analysis methods for reimbursement decision-making in healthcare: a step-by-step guide. **Expert Review of Pharmacoeconomics & Outcomes Research**, 14:1, 81-99, 2014.
- DIN, M. I. *et al.* A review on biomass selection criteria and its preliminary test for pyrolysis technique. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 00, n. 00, p. 1-12, 2021a.
- DIN, M. I. *et al.* Pyrolysis of almond shell biomass: effect of temperature and catalyst on product yield. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 00, n. 00, p. 1-14, 2021b.

EMEKSIZ, C.; YÜKSEL, A. A suitable site selection for sustainable bioenergy production facility by using hybrid multi-criteria decision making approach, case study: Turkey. **Fuel**, v. 315, n. January, p. 123214, 2022.

ESCALANTE, H.; CASTRO, L.; RODRÍGUEZ, R. Spatial Decision Support System to Evaluate Crop Residue Energy Potential by Anaerobic Digestion 1. **Bioresource Technology**, 2016.

FEIZ, R.; AMMENBERG, J. Assessment of feedstocks for biogas production, part I: a multi-criteria approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 373-387, 2017.

FIGUEIREDO, J. C. **Estimativa de produção de biogás e potencial energético dos resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

PENSADOR, G. O. **Racismo é burrice**. Rio de Janeiro: 2003. (Mp3 - 4 min.)

GARFÍ, M. *et al.* Evaluating benefits of low-cost household digesters for rural Andean communities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 575-581, 2012.

GUARES, S. A.; LIMA, J. D.; OLIVEIRA, G. A. Techno-economic model to appraise the use of cattle manure in biodigesters in the generation of electrical energy and biofertilizer. **Biomass and Bioenergy**, v. 150, 2021.

HALL, D. O. Biomass energy in industrialised countries: a view of the future. **Forest Ecology and Management**, v. 91, n. 1, p. 17-45, 1997.

HARSONO, S. S.; GRUNDMANN, P.; SOEBRINTO, S. Anaerobic treatment of palm oil mill effluents: potential contribution to net energy yield and reduction of greenhouse gas emissions from biodiesel production. **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 619-627, 2014.

HIREMATH, R. B.; *et al.* Decentralised renewable energy: scope, relevance and applications in the Indian context. **Energy for Sustainable Development**, v. 13, n. 1, p. 4-10, 2009.

HOLM-NIELSEN, J. B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 22, p. 5478-5484, 2009.

HOLTMEYER, M. L. *et al.* The impact of biomass cofiring on volatile flame length. **Energy and Fuels**, v. 27, n. 12, p. 7762-7771, 2013.

HORAN, N. J. Introduction. *In*: HORAN, N.; YASER, A. Z.; WID, N. (Eds.). **Anaerobic Digestion Processes: Applications and Effluent Treatment**. Singapore: Springer Singapore, 2018. p. 1-7.

- HWANG, CL. YOON, K. Methods for multiple attribute decision making. *In: MULTIPLE attribute decision making. **Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems***, v. 186, 1981. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3). Acesso em: 12 fev. 2022.
- JOPPERT, C. L.; *et al.* Highlights. **Journal of Cleaner Production**, 2018.
- KABIR, G.; HASIN, M. A. A. Integrating modified Delphi method with Fuzzy AHP for optimal power substation location selection. **International Journal of Multicriteria Decision Making**, v. 3, n. 4, p. 381-398, 2013.
- KANWAR, S. S.; GULERI, R. L. Performance evaluation of a family-size, rubber-balloon biogas plant under hilly conditions. **Bioresource Technology**, v. 50, n. 2, p. 119-121, 1994.
- KASIRI, S. M.; *et al.* Anaerobic processes. **Water Environment Research**, v. 84, n. 4, p. 398-406, 2012.
- KHAN, E. U.; *et al.* Techno-economic analysis of small scale biogas based polygeneration systems: Bangladesh case study. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 7, p. 68-78, 2014.
- KOUL, B.; YAKOOB, M.; SHAH, M. P. Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. **Environmental Research**, v. 206, p. 112285, 2022.
- KULKARNI, I. *et al.* Closed-loop biodigesters on small-scale farms in low-and middle-income countries: a review. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 19, p. 1-20, 2021.
- KUO, M. S.; LIANG, G. S.; HUANG, W. C. Extensions of the multicriteria analysis with pairwise comparison under a Fuzzy environment. **International Journal of Approximate Reasoning**, v. 43, n. 3, p. 268-285, 2006.
- LAURI, P.; *et al.* Woody biomass energy potential in 2050. **Energy Policy**, v. 66, p. 19-31, 2014.
- LEE, E.; *et al.* Biogas production from high solids anaerobic co-digestion of food waste, yard waste and waste activated sludge. **Waste Management**, v. 95, p. 432-439, 2019.
- LFU, A. Biogashandbuch bayern: materialband. **Bayerisches Landesamt für Umwelt**, Augsburg, Germany, 2007.
- LIBERATI, A.; *et al.* The prisma statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. **PLoS medicine**, v. 6, n. 7, p. e1000100, 2009.
- LI, H.; *et al.* Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: a case study. **Applied Thermal Engineering**, v. 35, n. 1, p. 71-80, 2012.

- LIOU, J. J. H.; TZENG, G. H. Comments on "Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview". **Technological and Economic Development of Economy**, v. 18, n. 4, p. 672-695, 2012.
- MAHALAXMI, S.; WILLIFORD, C. Biochemical conversion of biomass to fuels. *In*: CHEN, W.-Y.; *et al.* (Eds.). **Handbook of Climate Change Mitigation**. New York, NY: Springer US, 2012. p. 965-999.
- MAINIER, F. B.; ROCHA, A. A. H<sub>2</sub>S: Novas rotas de remoção química e recuperação de enxofre. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 2., 2003., **Anais [...]**, 2003, p. 2-6.
- MARTÍ-HERRERO, J. Reduced hydraulic retention times in low-cost tubular digesters: Two issues. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 10, p. 4481-4484, 2011.
- MATHERI, A. N. *et al.* Design model selection and dimensioning of anaerobic digester for the OFMSW. **Lecture Notes in Engineering and Computer Science**, v. 2226, p. 846-851, 2016.
- MATHERI, A. N. *et al.* Quantitative characterization of carbonaceous and lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, p. 9-16, 2018a.
- MATHERI, A. N. *et al.* Design technology for bioenergy conversion of organic fraction of municipal solid waste. **Green Energy and Technology**, v. 0, n. 9783319636115, p. 181-201, 2018b.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002.
- MCKENDRY, P. Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine. **Fuel**, v. 95, p. 247-256, 2012.
- MEJDOUB, H.; KSIBI, H. Regulation of Biogas Production Through Waste Water Anaerobic Digestion Process: Modeling and Parameters Optimization. **Waste and Biomass Valorization**, v. 6, n. 1, p. 29-35, 2014.
- MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. **Energy and Fuels**, v. 20, n. 3, p. 848-889, 2006.
- MORGAN, H. M.; *et al.* A techno-economic evaluation of anaerobic biogas producing systems in developing countries. **Bioresource Technology**, v. 250, p. 910-921, 2018.
- MOULOGIANNI, C.; BOURNARIS, T. Biomass production from crops residues: ranking of agro-energy regions. **Energies**, v. 10, n. 7, 2017.
- MULINDA, C.; HU, Q.; PAN, K. Dissemination and problems of African biogas technology. **Energy and Power Engineering**, v. 05, n. 08, p. 506-512, 2013.

- NEVZOROVA, T.; KUTCHEROV, V. Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: a state-of-the-art review. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, p. 100414, 2019.
- NIRMAL, J. I. K.; *et al.* An evaluation of fuelwood properties of some Aravally mountain tree and shrub species of Western India. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 411-414, 2011.
- NJUGUNA MATHERI, A. *et al.* Waste to energy bio-digester selection and design model for the organic fraction of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1113-1121, 2018.
- ONGKUNARUK, P.; PIYAKARN, C. Logistics cost structure for mangosteen farmers in Thailand. **System Engineering Procedia**, 2, 40-48, 2011.
- OSSEI-BREMANG, R. N.; KEMAUSUOR, F. A decision support system for the selection of sustainable biomass resources for bioenergy production. **Environment Systems and Decisions**, v. 41, n. 3, p. 437-454, 2021.
- PAUER, E.; *et al.* Sustainability of flexible multilayer packaging: environmental impacts and recyclability of packaging for bacon in block. **Cleaner Environmental Systems**, n. October, p. 100001, 2020.
- RAJENDRAN, K.; ASLANZADEH, S.; TAHERZADEH, M. J. **Household biogas digesters-A review**. [s.l: s.n.]. v. 5.
- RAMOS-SUÁREZ, J. L.; *et al.* Biogas from animal manure: a sustainable energy opportunity in the Canary Islands. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 104, p. 137-150, 2019.
- RIBEIRO, H. C. M.; TAVARES, V. C. M. Comportamento e particularidades da produção acadêmica do tema “contabilidade gerencial” divulgada na base de dados do ISI WEB of Science Core Collection de 1985 a 2014. **Revista de Educação e Pesquisa em Contabilidade (REPeC)**, v. 11, n. 1, p. 5-29, 2017.
- RISCADO, M. S.; SOUSA, V. S.; FERRONATO, L. M. **Revista Brasileira de Energia**, v. 24, 2018.
- RODRÍGUEZ, R.; GAUTHIER-MARADEI, P.; ESCALANTE, H. Fuzzy spatial decision tool to rank suitable sites for allocation of bioenergy plants based on crop residue. **Biomass and Bioenergy**, v. 100, p. 17-30, 2017.
- ROHSTOFFE, F. N. **Handreichung biogasgewinnung und-nutzung**. [s.l: s.n.], 2006.
- RUAS, T. L.; PEREIRA, L. How to build science, technology, and innovation indicators using web of of science, Derwent World Patent Index, Bibexcel, and Pajek? **Perspectivas em Ciencia da Informação**, v. 19, n. 3, p. 52-81, 2014.

RUPF, G. V. *et al.* Development of an optimal biogas system design model for Sub-Saharan Africa with case studies from Kenya and Cameroon. **Renewable Energy**, v. 109, p. 586-601, 2017.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987.

SADIKU, N. A.; OLUYEGE, A. O.; SADIKU, I. B. Analysis of the calorific and fuel value index of bamboo as a source of renewable biomass feedstock for energy generation in Nigeria. **Lignocellulose**, v. 5, n. 1, p. 34-49, 2020.

SCARLAT, N.; *et al.* A spatial analysis of biogas potential from manure in Europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 915-930, 2018.

SEABRA JÚNIOR, E.; COLMENERO, J. C.; BRAGHINI JÚNIOR, A. Biomass selection method to produce biogas with a multicriteria approach. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 6, p. 3169-3177, 2021.

SHARMA, V. K.; *et al.* Innovation for production of next generation biofuel from lignocellulosic wastes. **Climate Change Water**, v. 1, n. 1, p. 20-44, 2018.

SIDDIQUI, S.; *et al.* Biomass and Bioenergy Distribution of specific greenhouse gas emissions from combined heat-and-power production in agricultural biogas plants. **Biomass and Bioenergy**, v. 133, p. 105443, 2022.

SINGH, S. P.; VATSA, D. K.; VERMA, H. N. Problems with biogas plants in Himachal Pradesh. **Bioresource Technology**, v. 59, n. 1, p. 69-71, 1997.

STRIK, D. P. B. T. B.; DOMNANOVICH, A. M.; HOLUBAR, P. A pH-based control of ammonia in biogas during anaerobic digestion of artificial pig manure and maize silage. **Process Biochemistry**, v. 41, n. 6, p. 1235-1238, 2006.

TALEGHANI, G.; KIA SHABANI, A. Technical-economical analysis of the Saveh biogas power plant. **Renewable Energy** 30, v. 30, p. 441-446, 2005.

TANG, J. F. *et al.* Understanding of Fuzzy optimization: theories and methods. **Journal of Systems Science and Complexity**, v. 17, n. 1, p. 117-136, 2004.

TAO, G. *et al.* Biomass properties in association with plant species and assortments I: a synthesis based on literature data of energy properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 3481-3506, 2012.

THUMMES, K.; KÄMPFER, J. P; JÄCKEL, U. Thermophilic methanogenic archaea in compost material: occurrence, persistence and possible mechanisms for their distribution to other environments. **Syst. Appl. Microbiol.** 30, p. 634-643, 2007.

TSAURA, S. H.; CHANG, T. Y.; YEN, C. H. The evaluation of airline service quality by Fuzzy MCDM. **Tourism Management**, v. 23, n. 2, p. 107-115, 2002.

TURSI, A. A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion. **Biofuel Research Journal**, v. 6, n. 2, p. 962-979, 2019.

VALDEZ-VAZQUEZ, I.; ACEVEDO-BENÍTEZ, J. A.; HERNÁNDEZ-SANTIAGO, C. Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 7, p. 2147-2153, 2010.

VASCO-CORREA, J. *et al.* Anaerobic digestion for bioenergy production: Global status, environmental and techno-economic implications, and government policies. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 1015-1026, 2018.

WANG, C.-N.; *et al.* A model for selecting a biomass furnace supplier based on qualitative and quantitative factors. **Computers, Materials and Continua**, v. 69, n. 2, p. 2339-2353, 2021.

WANG, J. J.; *et al.* Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2263-2278, 2009.

WANG, Y.; SUN, Y.; WU, K. Methods to determine the interactions between the biomass and the pellet channel during biomass pelletizing process. **Waste and Biomass Valorization**, n. 0123456789, 2019.

WERNER, U.; STOHR, U.; HESS, N. **Biogas plants in animal Husbandry: a publication of the Deustshces Zentrung a division of the GTZ**, 1989.

WIND, Y.; SAATY, T. L. **Marketing Applications of the Analytic Hierarchy Process. Management Science**, 1980.

XAVIER, S.; NAND, K. A preliminary study on biogas production from cowdung using fixed-bed digesters. **Biological Wastes**, v. 34, n. 2, p. 161-165, 1990.

YADVIKA, E; *et al.* Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques: a review. **Bioresource Technology**, v. 95, n. 1, p. 1-10, 2004.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. Computing in civil and building engineering. *In*: INTERNATIONAL Conference on Computing in Civil and Building Engineering, v. 353, p. 1562-1569, 2014.

ZAMANI, A. Introduction to lignocellulose-based products. *In*: KARIMI, K. (Ed.). **Lignocellulose-Based Bioproducts**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 1-36.

## **APÊNDICE A - PROCEDIMENTO BIBLIOGRÁFICO**

A análise bibliométrica consiste em aplicar métodos de pesquisa em base de dados, objetivando identificar as características de um tema que se pretende desenvolver, assim como dados da quantidade de produção científica ligados a este tema. Possibilita a mensuração do arcabouço de publicações acadêmicas de determinado assunto ou área do conhecimento (RIBEIRO; TAVARES, 2017).

Para a aplicação da Revisão Bibliográfica Sistemática, utilizou-se as bases do método Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis (PRISMA). Esse método utiliza uma abordagem sistemática e explícita para identificar, selecionar e avaliar os dados de pesquisa que irão formar a revisão (LIBERATI *et al.* 2009).

Na busca pelos registros de pesquisa existentes para formar o portfólio bibliográfico, levando em consideração o tema desta pesquisa (seleção de biomassa e de biodigestores), iniciou-se o rastreamento sem restrição de ano, analisando o título, abstract e combinação de palavras-chave: *biomass selection*, *agricultural wastes*, *biodigester selection*, *biodigester model/type* e *multicriteria/MCDM*, utilizando o operador booleano AND e nas bases da *Scopus* e *ScienceDirect*. O resultado da busca foi um total de 147 artigos, conforme demonstrado na Tabela 26.

**Tabela 26 - Resultado da busca nas bases Scopus e ScienceDirect**

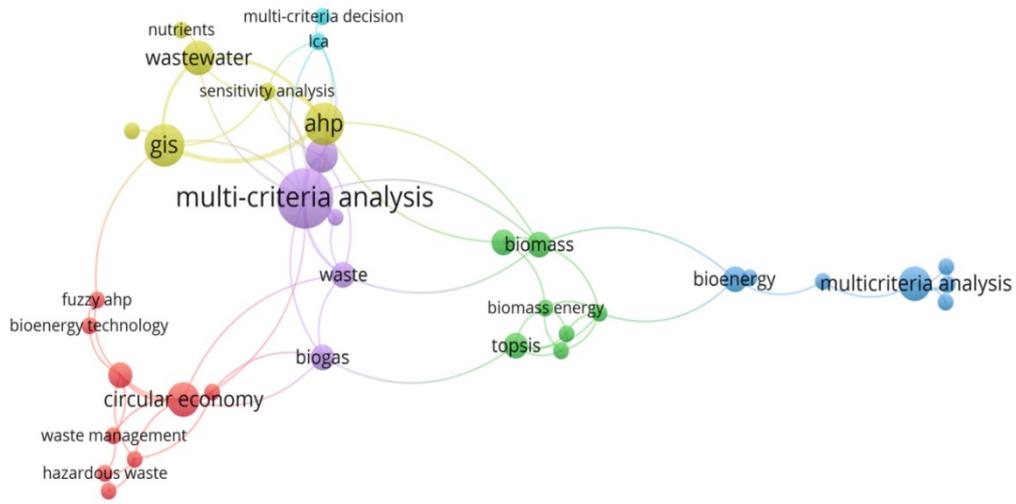
String de busca	<i>Scopus</i>	<i>Science Direct</i>
	Nº de artigos	
Biomass selection "AND" Multicriteria/MCDM	58	5
Agricultural wastes "AND" Multicriteria/MCDM	67	5
Biodigester selection "AND" Multicriteria/MCDM	7	1
Biodigester model/type "AND" Multicriteria/MCDM	3	1
Total de artigos	147	

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Para demonstrar graficamente a relação entre as palavras-chave e os artigos encontrados, foi utilizada a ferramenta *VOSviewer*. Essa ferramenta permite a visualização e geração de mapas bibliométricos através da apresentação dos dados no formato de redes ou grafos. Por meio da agregação em rede, é possível visualizar as relações entre os autores e as publicações, repetição e relação entre as palavras-



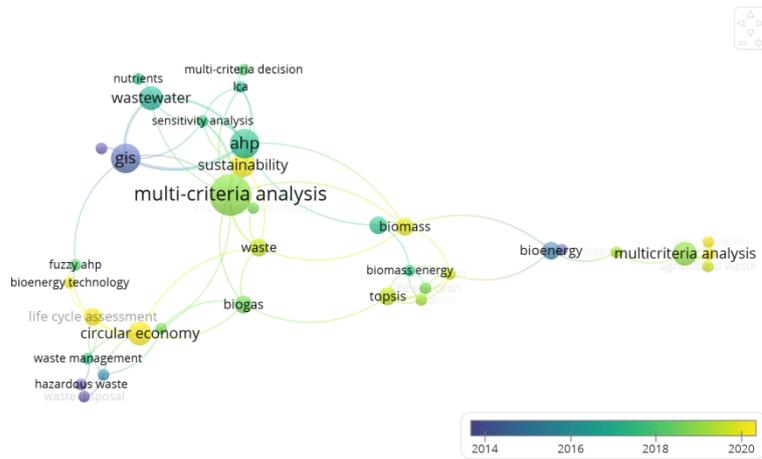
**Figura 12 - Relação em rede de palavras-chave encontradas somente nos artigos do portfólio bibliográfico**



Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 13 mostra a relação de atualidade das palavras-chave encontradas no portfólio bibliográfico.

**Figura 13 - Relação da palavra-chave versus o ano de citação**



Fonte: Autoria própria (2022).

**APÊNDICE B - QUESTIONÁRIO PARA AVALIAÇÃO DA IMPORTÂNCIA DOS  
CRITÉRIOS**

## **ANÁLISE DOS CRITÉRIOS**

O questionário teve como objetivo constatar a opinião de um especialista na área de biogás (especialista 1) sobre a relação de importância entre os critérios que foram utilizados como referência para proceder à seleção biomassa, com vistas na produção de biogás e no tipo de biodigestor.

Para avaliar a importância de cada critério, pode ser aplicado o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*-Processo Analítico Hierárquico), que realiza uma comparação par a par dos critérios, atribuindo um valor de 1 a 9, sendo que 1 significa que os critérios têm a mesma importância, e 9 seria a importância absoluta de um critério sobre o outro, conforme mostra o Quadro 10.

## **ORIENTAÇÕES QUANTO À AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS**

Identifique nos respectivos quadros com (A) ou (B) na primeira coluna, qual dos dois critérios é mais importante.

Atribuir o valor entre 1 e 9 para identificar o grau de importância de uma perspectiva em relação à outra.

Caso a comparação do grau de importância entre dois critérios seja igual, deixar o campo em branco e preencher com valor igual a 1 o campo da coluna: grau de importância.

## CRITÉRIOS CONSIDERADOS PARA SELEÇÃO DA BIOMASSA

**PRODUÇÃO DE BIOMASSA:** quantidade de biomassa produzida em determinada região.

**VOLUME DO BIOGÁS:** quantidade de volume do biogás gerado.

**CAPACIDADE ENERGÉTICA:** potencial de geração de energia da biomassa.

**CUSTO LOGÍSTICO:** custo com a logística da biomassa da coleta até o biodigestor.

**Quadro 6 - Comparação par a par dos critérios para seleção de biomassa**

CRITÉRIO (A)	CRITÉRIO (B)	Qual é mais importante? (A) ou (B)	Grau de importância (1 a 9)
Produção de Biomassa (1)	Volume de biogás (2)	A	9
	Capacidade energética (3)	A	9
	Custo logístico (4)	B	9
Volume de Biogás (2)	Produção de biomassa (1)	B	1/9
	Capacidade energética (3)	B	3
	Custo logístico (4)	B	8
Capacidade Energética (3)	Produção de biomassa (1)	B	1/9
	Volume de biogás (2)	B	3
	Custo logístico (4)	B	7
Custo logístico (4)	Produção de biomassa (1)	A	9
	Volume de biogás (2)	A	8
	Capacidade energética (3)	B	7

**Fonte: Autoria própria (2022).**

## **CRITÉRIOS CONSIDERADOS PARA SELEÇÃO DO BIODIGESTOR**

**CUSTOS DE INSTALAÇÃO:** refere-se aos custos envolvidos no processo de instalação do tipo de biodigestor, custos envolvendo mão de obra e materiais. Os custos envolvidos são altos ou baixos? Este tipo de biodigestor é acessível para todos os proprietários rurais ou apenas para grandes empreendimentos?

**LIMPEZA E MANUTENÇÃO:** refere-se ao processo de limpeza e manutenção do biodigestor. Como se dá o processo de limpeza e manutenção: é simples ou complexo? Exige mão de obra especializada?

**EFICIÊNCIA NO TRATAMENTO:** refere-se à qualidade do tratamento da biomassa.

Qual a eficiência do tratamento da biomassa utilizando este tipo de biodigestor? Este tipo de biodigestor permite a remoção completa da carga orgânica do material, deixando-o inerte? Permite produzir biogás de forma constante?

**VOLUME DO BIOGÁS:** refere-se à quantidade de volume de biogás que o biodigestor pode armazenar. Possui gasômetro?

**VIDA ÚTIL:** refere-se ao tempo aproximado de durabilidade do equipamento e das peças.

**Quadro 7 - Comparação par a par dos critérios para o biodigestor**

CRITÉRIO (A)	CRITÉRIO (B)	Qual é mais importante? (A) ou (B)	Grau de importância (1 a 9)
Custos de instalação (1)	Limpeza e manutenção (2)	A	9
	Eficiência no tratamento (3)	A	9
	Volume de biogás (4)	A	9
	Vida útil (5)	A	9
	Fluxo (6)	A	9
Limpeza e manutenção (2)	Custo de instalação (1)	B	1/9
	Eficiência no tratamento (3)	A	4
	Volume de biogás (4)	A	9
	Vida útil (5)	A	5
	Fluxo (6)	A	4
Eficiência no tratamento (3)	Custo de instalação (1)	B	1/9
	Limpeza e manutenção (2)	B	1/4
	Volume de biogás (4)	A = B	1
	Vida útil (5)	A	2
	Fluxo (6)	A = B	1
Volume de biogás (4)	Custo de instalação (1)	B	1/9
	Limpeza e manutenção (2)	B	1/9
	Eficiência no tratamento (3)	A = B	1
	Vida útil (5)	A = B	1
	Fluxo (6)	A = B	1
Vida útil (5)	Custo de instalação (1)	B	1/9
	Limpeza e manutenção (2)	B	1/5
	Eficiência no tratamento (3)	B	1/2
	Volume de biogás (4)	A = B	1
	Fluxo (6)	A = B	1
Fluxo (6)	Custo de instalação (1)	B	1/9
	Limpeza e manutenção (2)	B	1/4
	Eficiência no tratamento (3)	A = B	1
	Volume de biogás (4)	A = B	1
	Vida útil (5)	A = B	1

Fonte: Autoria própria (2022).

**APÊNDICE C - RESULTADO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA  
OBTENÇÃO DOS PESOS PARA OS CRITÉRIOS RELATIVOS À SELEÇÃO DA  
BIOMASSA**

**Figura 14 - Aplicação do AHP para critérios de seleção da biomassa**

POWER METHOD (4x4)

	1	2	3	4
1	1	1	1	0,111111111
2	1	1	3	0,125
3	1	0,333333333	1	0,142857143
4	9	8	7	1

Vetor Prioridade
0,08680
0,12386
0,07249
0,71685

	CI	RCI
	0,05994	0,9
	CR	0,06660

Fonte: Autoria própria (2022).

**APÊNDICE D - RESULTADO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA  
OBTENÇÃO DOS PESOS PARA OS CRITÉRIOS RELATIVOS À SELEÇÃO DO  
TIPO DE BIODIGESTOR**

**Figura 15 - Aplicação do AHP para critérios de seleção do biodigestor**

POWER METHOD (6x6)

	1	2	3	4	5	6
1	1	9	9	9	9	9
2	0,11111111	1	4	9	5	4
3	0,11111111	0,25	1	1	2	1
4	0,11111111	0,11111111	1	1	1	1
5	0,11111111	0,2	0,5	1	1	1
6	0,11111111	0,25	1	1	1	1

Vetor Prioridade
0,62293
0,19381
0,05304
0,04250
0,04106
0,04667

	CI	RCI
CI	0,08956	1,24
CR	0,07223	

**Fonte: Autoria própria (2022).**

**APÊNDICE E - AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS PELAS VARIÁVEIS  
LINGUÍSTICAS UTILIZANDO O NÚMERO FUZZY TRIANGULAR**

**Tabela 27 - Variáveis linguísticas para avaliação dos critérios**

Variáveis linguísticas - Critérios	Código	a	b	c
Very poor	VP	0	0	0,1
Poor	P	0	0,1	0,3
Medium poor	MP	0,1	0,3	0,5
Fair	F	0,3	0,5	0,7
Medium good	MG	0,5	0,7	0,9
Good	G	0,7	0,9	1
Very good	VG	0,9	1	1

Fonte: Adaptado de Chen (2000).

**Quadro 8 - Resultado da avaliação dos critérios pelos três especialistas**

Critério	Max/Min	Decisor 1	Decisor 2	Decisor 3
C1	-	VG	VG	G
C2	-	G	MG	G
C3	+	MP	MP	MP
C4	+	VG	VG	VG
C5	+	VG	VG	VG
C6	+	MG	MG	MG

Fonte: Autoria própria (2022).

**APÊNDICE F - AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS PELAS VARIÁVEIS  
LINGUÍSTICAS UTILIZANDO O NÚMERO FUZZY TRIANGULAR**

**Tabela 28 - Variáveis linguísticas para avaliação das alternativas**

Variáveis linguísticas - alternativas	Código	a	b	c
Very poor	VP	0	0	1
Poor	P	0	1	3
Medium poor	MP	1	3	5
Fair	F	3	5	7
Medium good	MG	5	7	9
Good	G	7	9	10
Very good	VG	9	10	10

Fonte: Adaptado de Chen (2000).

**Quadro 9 - Resultado da avaliação das alternativas pelo especialista 1**

Decisor	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Decisor 1	MP	MG	F	MP	VG	MP
	MP	F	MG	F	VG	F
	F	MG	G	MG	VG	F
	P	VG	VG	MG	MP	MG
	P	VG	G	G	P	MG
	MG	MG	MG	G	G	F

Fonte: Autoria própria (2022).

**Quadro 10 - Resultado da avaliação das alternativas pelo especialista 2**

Decisor	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Decisor 2	F	MG	P	MG	VG	F
	F	G	MP	MG	VG	F
	MG	VG	F	MG	MG	MG
	VP	VG	VG	VG	P	F
	P	VG	G	VG	P	VG
	F	G	G	MG	MG	MG

Fonte: Autoria própria (2022).

**Quadro 11 - Resultado da avaliação das alternativas pelo especialista 3**

Decisor	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Decisor 3	F	VG	F	G	MG	MG
	F	VG	MG	G	VG	VG
	F	G	MG	VG	VG	F
	VP	VG	G	MG	VP	VG
	P	G	VG	MG	P	VG
	G	G	G	G	G	G

Fonte: Autoria própria (2022).