

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Avaliação técnico-econômica da geração de energia  
elétrica a partir do biogás em sistemas de digestão  
anaeróbia centralizada e descentralizada no Brasil**

**Jean Agustin Velásquez Piñas**

**Itajubá, julho de 2016**  
**Minas Gerais - Brasil**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Jean Agustin Velásquez Piñas**

**Avaliação técnico-econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás em sistemas de digestão anaeróbia centralizada e descentralizada no Brasil**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.**

**Área de Concentração: Exploração do uso racional de recursos naturais e energia (Sistemas Energéticos - SE)**

**Orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini**  
**Co-orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora**

**Itajubá, julho de 2016**

**Minas Gerais - Brasil**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Jean Agustin Velásquez Piñas**

**Avaliação técnico-econômica da geração de energia  
elétrica a partir do biogás em sistemas de digestão  
anaeróbia centralizada e descentralizada no Brasil**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 14 de julho de 2016, conferindo ao autor o título de *Mestre em Ciências em Engenharia de Energia*.

**Banca examinadora:**

Prof. Dr. Osvaldo José Venturini – UNIFEI (Orientador)  
Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora – UNIFEI (Co-Orientador)  
Prof<sup>ª</sup>. Dra. Regina Mambeli Barros – UNIFEI  
Prof<sup>ª</sup>. Dra. Karina Ribeiro Salomon – UFAL

Itajubá, julho de 2016

Minas Gerais - Brasil



Ministério da Educação  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
Criada pela Lei nº 10435, de 24 de abril de 2002

**FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE  
MESTRADO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

Eu, **Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Karina Ribeiro Salomon**, 1<sup>a</sup> Examinadora (por videoconferência) da banca de Dissertação de Mestrado do aluno **Jean Agustin Velásquez Piñas**, intitulado **"Avaliação técnico-econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás em sistemas de digestão anaeróbia centralizada e descentralizada no Brasil"** após o julgamento da Dissertação, recomendo:

| Examinadores | Conceito | Rubrica                       |
|--------------|----------|-------------------------------|
| 1º           | A        | <i>Karina Ribeiro Salomon</i> |

**A - APROVADO:** Se a Tese obtiver aprovação unânime da Comissão Examinadora.

**AC- APROVADO CONDICIONAL:** Quando a Comissão Examinadora entender que a Tese deva sofrer alterações de conteúdo ou conter resultados novos ou adicionais.

**RE- REEXAME:** Quando a Comissão Examinadora entender que a Tese, embora contendo contribuições relevantes, não tenha sido defendida adequadamente, ou deve sofrer modificações mais profundas. Caso em que o candidato terá mais uma única e última oportunidade para reestruturar a Tese se for o caso, e defendê-la novamente em um prazo não superior a 6 (seis) meses contados a partir da data da primeira defesa.

**R- REPROVAÇÃO:** Quando a Comissão Examinadora entender que a Tese não contém contribuições relevantes para a área do tema da Tese.

Autorizo o presidente da banca, Prof. Dr. Osvaldo José Venturini, a assinar por mim a ata de defesa pública da Dissertação de Mestrado.

Itajubá, 14 de julho de 2016.

*Karina Ribeiro Salomon*  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Karina Ribeiro Salomon  
1<sup>a</sup> Examinadora – UFAL



Ministério da Educação  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
 Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

## A N E X O I

### FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: **“Avaliação técnico-econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás em sistemas de digestão anaeróbia centralizada e descentralizada no Brasil”**

Autor: **Jean Agustin Velásquez Piñas**

#### JULGAMENTO

| Examinadores | Conceito                     | Rubrica |
|--------------|------------------------------|---------|
|              | A = Aprovado - R = Reprovado |         |
| 2º           | A                            |         |
| 3º           | A                            |         |
| 4º           | A                            |         |

Resultado Final: Conceito final: A, ou seja, Aprovado

Observações: \_\_\_\_\_

#### Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado (A) se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
  - (2) O Trabalho será considerado Reprovado (R) se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
  - (3) O Trabalho será considerado no Conceito final como Insuficiente (I) se for atribuído um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.
- Este documento terá a validade de 30 (trinta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.**

Itajubá, 14 de julho de 2016.

Prof.ª Dr.ª Regina Mambeli Barros  
 2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Eduardo Electo Silva Lora  
 3º Examinador (Co-orientador) - UNIFEI

Prof. Dr. Osvaldo José Venturini  
 4º Examinador - UNIFEI - (Orientador)

## **Dedicatória**

A minha esposa Orly, e ao meu filho Gabriel, meus companheiros nesta aventura, e com os quais comparti momentos inesquecíveis. A meus pais Zacarias e Hilda, meu exemplo de perseverança e luta. A minhas irmãs Kattia, Judith, Lilliam e Mayra, das quais sempre lembro com muita alegria.

## **Agradecimentos**

A Deus e a Nossa Senhora de Aparecida por dar-me valor e fortaleza nos momentos de maior fraqueza.

Aos meus professores Electo Silva e Osvaldo Venturini, pela confiança na realização deste trabalho e por permitir-me ser seu orientado.

Aos meus amigos, companheiros, com os quais compartilhe momentos de minha vida, por seu apoio e amizade incondicional.

Aos meus professores do NEST e professores do Mestrado em Engenharia de Energia, por seus conhecimentos transmitidos.

À belíssima cidade de Itajubá a qual nos deu todo quanto necessitamos para fazer de nossa permanência muito prazenteira.

À Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Apoio da Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), por sua colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Núcleo de Excelência Em Geração Térmica e Distribuída (NEST) e à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), por seu acolhimento no tempo de minha permanência nesta cidade.

## **Epígrafe**

*As oportunidades multiplicam-se à medida que  
são agarradas.*

*Sun Tzus*

*Aqueles que passam por nós, não vão sós, não  
nos deixam sós. Deixam um pouco de si, levam  
um pouco de nós.*

*Antoine de Saint-Exupéry*

## Resumo

PIÑAS, J. A. V. “*Avaliação técnico-econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás em sistemas de digestão anaeróbia centralizada e descentralizada no Brasil*”, Itajubá, 2016. 193p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Universidade Federal de Itajubá, 2016.

O interesse na digestão anaeróbia tem crescido principalmente pela possibilidade de tratamento de resíduos sólidos e tratamento de águas residuárias. No entanto, nos últimos anos tem sido desenvolvidas tecnologias para a utilização de diferentes matérias-primas, dentro das quais, a utilização das culturas energéticas dedicadas se tornam atrativas, devido a seu alto conteúdo de biogás por tonelada de matéria fresca; além de que, ao ser misturadas com dejetos de animais, estes podem ter uma adequada relação C:N, o qual pode garantir a produção de biogás nas condições ótimas. Contudo, a produção destas culturas energéticas dedicadas pode estar localizada em lugares distantes da usina de biogás, pelo que, seria necessário o deslocamento da biomassa até a usina, incorporando novos custos, além do custo de aquisição ou produção da biomassa. O presente trabalho tem por objetivo realizar uma avaliação técnica e econômica das alternativas de produção centralizada e descentralizada de biogás proveniente da digestão anaeróbia no contexto brasileiro, com a finalidade de gerar energia elétrica; se utilizou-se como matérias-primas para a produção de biogás, o esterco bovino, silagens de milho e silagem de capim elefante, e avaliou-se usinas de biogás de pequeno porte, médio porte e grande porte, nas potências elétricas compreendidas entre 100-1.000 kWe. Os resultados mostram que a percentagem ótima de silagem de milho em sistemas de co-digestão bovino-milho se encontram nos intervalos de 22-65%, para valores da relação C:N 20:1-30:1, enquanto que, a percentagem ótima de silagem de capim para sistemas de co-digestão bovino-capim se

encontram nos intervalos de 18-54%. A análise econômica realizada mostra que os sistemas de co-digestão centralizada e descentralizada para potências entre 100-1.000 kWe não são viáveis economicamente, enquanto que, os sistemas de mono-digestão descentralizados são viáveis para potências superiores a 740 kWe. A análise mostra também, que as distâncias de deslocamento de co-substratos para as potências avaliadas não têm impacto significativo na viabilidade econômica, sendo os custos da biomassa, silagem de milho e silagem de capim, os que representam mais do que 93% dos custos referentes à biomassa (aquisição e transporte). A análise de sensibilidade mostra que, os sistemas de co-digestão têm viabilidade econômica para preços superiores de venda de energia elétrica, 100,36 USD/MWh para sistemas de co-digestão bovino-milho e 83,71 USD/MWh para sistemas de co-digestão bovino-capim. A análise para usinas de biogás de grande escala, com potências maiores a 1.000 kWe, mostra que, potências acima de 2.500 kWe em sistemas de co-digestão bovino-milho e 1.200 kWe em sistemas de co-digestão bovino-capim têm economias mais favoráveis que, para usinas de biogás de menor porte. Finalmente para conseguir a viabilidade econômica dos projetos de biogás, para potências elétricas de 1.000 kWe, precisariam de subsídios ao investimento inicial acima de 48,73% em sistemas de co-digestão bovino-milho, enquanto que, os sistemas de co-digestão bovino-capim precisariam de subsídios acima de 18,79%; contudo, os subsídios para usinas de biogás em outros países onde foram desenvolvidos a co-digestão de culturas energéticas dedicadas se encontra em torno a 30% do investimento inicial.

***Palavras-chave:***

Digestão Anaeróbia Centralizada, Co-digestão, Usina de Biogás, Silagem de Milho, Silagem de Capim, Biomassa, Energias Renováveis

## Abstract

PIÑAS, J. A. V. *“Technical and economic assessment of electricity generation from biogas in centralized and decentralized anaerobic digestion systems in Brazil”*, Itajubá, 2016. 193p. Dissertation (Master in Energy Engineering). Federal University of Itajubá, 2016

The interest in anaerobic digestion has increased mainly due to possibilities of treatment of solid waste and wastewater. However, in recent years there has been developed technology for the use of different materials, where the use of dedicated energy crops become attractive due to its high biogas content per metric ton of fresh weight, the one that to be mixed with animal waste, can reach an adequate C:N ratio, that can guarantee the production of biogas in optimal conditions. Nonetheless, production of these dedicated energy crops can be located in places far from the biogas plant, so that the displacement of the biomass would be necessary to the plant, adding new costs, in addition of cost of acquisition or production of biomass. This study aimed to carry out a technical and economic assessment of alternatives for centralized and decentralized production of biogas from the anaerobic digestion in the Brazilian context, in order to generate electricity; using as raw materials for biogas production, cattle manure, maize silage and elephant grass silage, and evaluate small-scale, medium-scale and large-scale biogas plants, in the electrical power comprehended between 100-1,000 kWe. The results showed that the optimum percentage of maize silage in cattle-maize co-digestion systems are in the ranges of 22-65% to values of C: N ratio 20:1-30:1, whereas the percentage great grass silage for cattle-grass co-digestion systems are in the ranges of 18-54%. The economic analysis showed that the centralized and decentralized co-digestion systems for power between 100-1,000 kWe are not economically viable, while the decentralized mono-digestion systems are viable for powers higher than 740 kWe. The analysis also showed, that the distances of co-substrate displacement

for the evaluated powers, has no significant impact on the economic viability, being that the cost of biomass, maize silage and grass silage, who represent more than 93% of the costs related to biomass (acquisition and transport). The sensitivity analysis showed that the co-digestion systems have economic viability for higher selling prices for electricity, USD 100.36/MWh for cattle-maize co-digestion systems and USD 83.71/MWh for cattle-grass co-digestion systems. The analysis for large-scale plants with higher powers than 1,000 kWe, showed that, powers above 2,500 kWe in cattle-maize co-digestion systems and 1,200 kWe in cattle-grass co-digestion systems have more favorable economics that for smaller biogas plants. Finally, to achieve economic viability of biogas projects for electric power 1,000 kWe, need subsidies for initial investment above 48.73% in cattle-maize co-digestion systems, whereas, the cattle-grass co-digestion systems need subsidies above 18.79%; however, in other countries where the use of energy crops was developed, the subsidies for biogas plants used to be around 30% of the initial investment.

***Keywords:***

Centralized Anaerobic Digestion, Co-digestion, Biogas Plant, Maize Silage, Grass Silage, Biomass, Renewable Energy

## Sumário

|   |          |
|---|----------|
| Resumo .....  | viii     |
| Abstract.....   | x        |
| Sumário.....  | xii      |
| Lista de figuras .....                                    | xvii     |
| Lista de tabelas .....                                    | xx       |
| Lista de abreviaturas e siglas .....                      | xxii     |
| Lista de símbolos: letras latinas e gregas .....          | xxv      |
| <b>Capítulo 1. ....</b>                                   | <b>1</b> |
| <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                   | <b>1</b> |
| 1.1. Objetivos .....                                      | 5        |
| 1.1.1. Objetivo Geral .....                               | 5        |
| 1.1.2. Objetivos Específicos .....                        | 6        |
| 1.2. Escopo e limitações.....                             | 6        |
| 1.3. Estrutura do trabalho .....                          | 7        |
| <b>Capítulo 2. ....</b>                                   | <b>9</b> |
| <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                         | <b>9</b> |
| 2.1. Biogás e digestão anaeróbia .....                    | 9        |
| 2.1.1. História do biogás .....                           | 10       |
| 2.1.2. Características físicas e químicas do biogás ..... | 12       |
| 2.1.3. Equivalências energéticas .....                    | 14       |
| 2.1.4. Benefícios ambientais .....                        | 16       |
| 2.2. Fundamentos biológicos da digestão anaeróbia .....   | 17       |
| 2.2.1. Hidrólise .....                                    | 18       |
| 2.2.2. Acidogênese.....                                   | 20       |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.2.3. Acetogênese .....  | 21        |
| 2.2.4. Metanogênese .....   | 23        |
| 2.2.4.1. Metanogênese hidrogenotrófica .....                                      | 26        |
| 2.2.4.2. Metanogênese acetotrófica .....  | 26        |
| 2.2.4.3. Metanogênese metilotrófica .....   | 27        |
| 2.3. Regeneração de microrganismos .....  | 27        |
| 2.4. Estequiometria da reação anaeróbia .....                                     | 28        |
| 2.5. Parâmetros que influenciam na digestão anaeróbia .....                       | 29        |
| 2.5.1. pH e alcalinidade .....  | 31        |
| 2.5.2. Sólidos totais .....   | 33        |
| 2.5.3. Sólidos voláteis .....   | 33        |
| 2.5.4. Relação Carbono/Nitrogênio .....   | 34        |
| 2.5.5. Temperatura .....  | 36        |
| 2.5.5.1. Temperatura psicrófila .....   | 36        |
| 2.5.5.2. Temperatura mesófila: .....  | 37        |
| 2.5.5.3. Temperatura termófila .....  | 37        |
| 2.5.6. Tempo de retenção hidráulica .....   | 38        |
| 2.5.7. Agitação .....   | 39        |
| 2.5.8. Toxicidade/Inibidores .....  | 41        |
| 2.5.9. Tipo de substrato .....  | 42        |
| 2.5.10. Taxa de carga orgânica (Organic Loading Rate “OLR”) .....                 | 43        |
| 2.6. Considerações finais do capítulo .....                                       | 43        |
| <b>Capítulo 3. ....</b>   | <b>44</b> |
| <b>ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE MATERIAL AGRÍCOLA .....</b> | <b>44</b> |
| 3.1. Critérios para a seleção da tecnologia .....                                 | 44        |
| 3.1.1. Teor de matéria seca dos substratos .....                                  | 45        |
| 3.1.2. Tipo de alimentação .....  | 46        |
| 3.1.2.1. Reatores de fluxo pistonado (PFR) .....                                  | 46        |
| 3.1.2.2. Reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB) .....                     | 47        |
| 3.1.2.3. Reator contínuo de mistura completa (CSTR) .....                         | 48        |
| 3.1.2.4. Reatores em batelada (batch reator) .....                                | 49        |
| 3.1.3. Temperatura do processo .....  | 50        |
| 3.1.4. Número de fases do processo .....  | 51        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.2. Unidades agrícolas de digestão anaeróbia.....                             | 52        |
| 3.2.1. Biodigestores de uso doméstico (family-scale/household digesters) ..... | 53        |
| 3.2.2. Biodigestores de uso produtivo (farm-scale).....                        | 55        |
| 3.2.3. Biodigestores centralizados (joint co-digestion) .....                  | 57        |
| 3.3. Substratos para digestão anaeróbia .....                                  | 61        |
| 3.3.1. Dejetos animais.....  | 63        |
| 3.3.2. Culturas Energéticas Dedicadas (CED).....                               | 65        |
| 3.3.3. Silagens de culturas energéticas .....                                  | 68        |
| 3.4. Tecnologias de conversão energéticas do biogás.....                       | 69        |
| 3.4.1. Motores Gas-Otto .....  | 72        |
| 3.4.2. Motor de injeção .....  | 73        |
| 3.5. Mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL) .....                           | 74        |
| 3.6. Sistema de compensação de energia elétrica .....                          | 77        |
| 3.7. Digestão anaeróbia no Brasil e o mundo .....                              | 78        |
| 3.7.1. Digestão anaeróbia no mundo .....                                       | 78        |
| 3.7.2. Digestão anaeróbia no Brasil .....                                      | 80        |
| 3.8. Considerações finais do capítulo.....                                     | 84        |
| <b>Capítulo 4. ....</b>  | <b>87</b> |
| <b>METODOLOGIA.....</b>  | <b>87</b> |
| 4.1. Modelo de avaliação técnica .....   | 88        |
| 4.1.1. Requerimento de biogás e produção de energia elétrica .....             | 91        |
| 4.1.2. Quantidade dos substratos a utilizar .....                              | 92        |
| 4.1.3. Dimensionamento dos biodigestores .....                                 | 94        |
| 4.1.4. Gasto energético do biodigestor .....                                   | 96        |
| 4.2. Descrição dos cenários.....   | 101       |
| 4.3. Modelo de análise econômica .....   | 104       |
| 4.3.1. Principais indicadores econômicos – conceitos importantes.....          | 104       |
| 4.3.1.1. Valor presente líquido (VPL).....                                     | 104       |
| 4.3.1.2. Taxa interna de Retorno (TIR).....                                    | 105       |
| 4.3.1.3. Tempo de retorno de capital (TRC) ou Payback (PB) .....               | 106       |
| 4.3.1.4. Fluxo de caixa .....  | 107       |
| 4.3.1.5. Taxa mínima de atratividade (TMA).....                                | 108       |
| 4.3.1.6. Análise de sensibilidade .....  | 108       |

|   |            |
|---|------------|
| 4.3.2. Redução Certificada de Emissões (RCE) .....  | 109        |
| 4.3.3. Transporte de co-substratos .....  | 110        |
| 4.3.4. Fator de escala e custo dos equipamentos .....   | 113        |
| 4.3.5. Outras considerações e premissas adotadas para a análise econômica.....  | 115        |
| <b>Capítulo 5. ....</b>   | <b>118</b> |
| <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>   | <b>118</b> |
| 5.1. Avaliação técnica .....  | 118        |
| 5.1.1. Requerimento de biogás e produção de energia elétrica .....  | 121        |
| 5.1.2. Quantidade de substratos .....   | 122        |
| 5.1.3. Tamanho dos biodigestores .....  | 124        |
| 5.1.4. Gasto energético .....   | 127        |
| 5.2. Análise econômica .....  | 134        |
| 5.2.1. Distância e transporte .....   | 134        |
| 5.2.2. Custo de investimento e receitas obtidas .....   | 136        |
| 5.2.3. Análise de VPL, TIR e TRC.....   | 139        |
| 5.2.4. Análise de sensibilidade .....   | 142        |
| 5.2.4.1. Taxa Mínima de Atratividade (TMA).....   | 142        |
| 5.2.4.2. Custo da biomassa .....  | 145        |
| 5.2.4.3. Preço de venda de energia .....  | 147        |
| 5.3. Análises econômicas complementares .....   | 150        |
| 5.3.1. Tamanho de usina versus deslocamento de co-substratos .....  | 150        |
| 5.3.2. Subsídio para o investimento dos sistemas de co-digestão .....   | 153        |
| <b>Capítulo 6. ....</b>   | <b>155</b> |
| <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>   | <b>155</b> |
| 6.1. Conclusões .....   | 155        |
| 6.2. Recomendações e sugestões para trabalhos futuros.....  | 158        |
| <b>APÊNDICE A. Dados avaliados e utilizados para a dissertação.....</b>   | <b>159</b> |
| A1. Análise econômica para os diferentes cenários (VPL) .....   | 159        |
| A2. Distâncias médias de transporte de co-substratos .....  | 161        |
| A3. Fornecedores de sistemas de geração de energia elétrica e calor (CHP) para diferentes potências elétricas. Combustível: Biogás..... | 162        |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>164</b> |
| <b>ANEXO A. Base de dados de digestão anaeróbia .....</b>   | <b>184</b> |
| A1. Características das unidades de digestão anaeróbia no Brasil .....  | 185        |

|   |            |
|---|------------|
| A2. Rendimento específico de metano de diversos substratos .....                    | 192        |
| <b>ANEXO B. Artigos e publicações relacionados ao trabalho de dissertação .....</b> | <b>193</b> |

## Lista de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 – Variação do poder calorífico inferior como uma função do conteúdo de metano e vapor de água.....   | 14 |
| Figura 2.2 – Diagrama esquemático da degradação anaeróbia de compostos orgânicos com grupos microbianos envolvidos para produção de biogás .....                              | 18 |
| Figura 2.3 – Formação de monômeros .....  | 19 |
| Figura 2.4 – Degradação do ácido acetoacético pela via do ácido butírico.....   | 21 |
| Figura 2.5 – Parcela aproximada de ST, SV e SF dos substratos.....  | 34 |
| Figura 2.6 – Influência da temperatura sobre o tempo de digestão.....   | 39 |
| Figura 2.7 – Agitadores para biodigestores: (a) agitador axial submersível com altura ajustável (esquerda), (b) agitador de pá.....   | 40 |
| Figura 2.8 – Produção de biogás a partir de diferentes substratos .....   | 42 |
| Figura 3.1 – Reator do processo DRANCO® com vista na saída cônica (digestão seca) .....   | 46 |
| Figura 3.2 – Reactores de alimentação contínua: (a) reator DRANCO® de fluxo pistonado vertical; (b) reator de fluxo pistonado horizontal .....                                | 47 |
| Figura 3.3 – Reator anaeróbico de fluxo ascendente (UASB).....  | 48 |
| Figura 3.4 – Reator contínuo de mistura completa (CSTR).....  | 49 |
| Figura 3.5 – Digestores em batelada: (a) digestores de baía ou tipo garagem; (b) tecnologia de digestão BEKON® .....  | 50 |
| Figura 3.6 – Digestão anaeróbia em fases: (a) digestão anaeróbia de fluxo contínuo em duas fases; (b) digestão anaeróbia de várias fases em batelada.....                     | 51 |
| Figura 3.7 – Principais tipos de biodigestores rurais: (a) biodigestor chinês, (b) biodigestor indiano, (c) biodigestor taiwanês e (d) biodigestor camartec (africano). ..... | 54 |
| Figura 3.8 – Representação esquemática de biodigestores de uso produtivo: (a) biodigestor horizontal de aço e (b) biodigestor “dois em um”, com cobertura de geomembrana..... | 56 |
| Figura 3.9 – Biodigestor tipo canadense instalado em IFSULDEMINAS – Campus Muzambinho.....  | 57 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 3.10 – Representação esquemática de ciclo sustentável de co-digestão anaeróbia de estrume animal e resíduos orgânicos .....  | 59  |
| Figura 3.11 – Conceito de sistema de digestão anaeróbia centralizada.....   | 60  |
| Figura 3.12 – Usina de biogás Lemvig, Dinamarca .....   | 61  |
| Figura 3.13 – Rendimento específico de metano de diferentes substratos e mistura de substratos em base ao % de sólidos voláteis.....  | 62  |
| Figura 3.14 – Processamento gastrointestinal de rações dos bovinos .....  | 64  |
| Figura 3.15 – Visão geral de utilização do biogás.....  | 70  |
| Figura 3.16 – Ciclo Rankine.....  | 71  |
| Figura 3.17 – Motor a gás-Otto de uma usina de biogás.....  | 73  |
| Figura 3.18 – Motor de injeção de duplo combustível de 235 kWe com uma turbina a gás de escape integrada de 30 kWe .....  | 73  |
| Figura 3.19 – Produção anual de energia partir de biogás em alguns países membro da <i>IEA Bioenergy Task 37</i> .....  | 79  |
| Figura 3.20 – Usinas de biogás no Brasil nos diferentes estados: produção de biogás x quantidade de usinas.....   | 82  |
| Figura 3.21 – Mapa de localização das usinas de biogás instaladas no Brasil .....   | 82  |
| Figura 4.1 – Planta de biogás agrícola utilizando co-digestão de esterco e CED .....  | 88  |
| Figura 4.2 – Sistema de digestão anaeróbia centralizada .....   | 89  |
| Figura 4.3 – Sistema de digestão anaeróbia descentralizada.....   | 89  |
| Figura 4.4 – Etapas desenvolvidas para a avaliação técnica .....  | 100 |
| Figura 4.5 – Cenários avaliados para a produção de biogás em sistemas descentralizados...   | 102 |
| Figura 4.6 – Cenários avaliados para a produção de biogás em sistemas centralizados .....   | 103 |
| Figura 4.7 – Etapas desenvolvidas para a análise econômica .....  | 117 |
| Figura 5.1 – Regressão das eficiências elétrica e térmicas de CHP para biogás.....  | 119 |
| Figura 5.2 – Relação C:N das misturas bovino-milho e bovino-capim.....  | 120 |
| Figura 5.3 – Variação do TRH em função da temperatura de trabalho do biodigestor.....   | 125 |
| Figura 5.4 – Volumes do biodigestor para os sistemas de mono-digestão esterco bovino e co-digestão bovino-milho e bovino-capim para as diferentes potências avaliadas ..... | 126 |
| Figura 5.5 – Consumo de energia elétrica com referência do total de energia elétrica produzida pelo sistema CHP .....   | 127 |
| Figura 5.6 – Consumo de calor com referência do total de calor produzida pelo sistema CHP .....   | 128 |
| Figura 5.7 – Custos do transporte de biomassa em USD/ton para algumas opções.....   | 135 |
| Figura 5.8 – Receitas obtidas dos sistemas mono-digestão bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim .....  | 139 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.9 – Análise econômica dos sistemas descentralizados de mono-digestão bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim.....   | 140 |
| Figura 5.10 – Análise econômica dos sistemas centralizados de co-digestão bovino-milho .   | 141 |
| Figura 5.11 – Análise econômica dos sistemas centralizados de co-digestão bovino-capim.  | 141 |
| Figura 5.12 – Análise de sensibilidade: influência da TMA nos sistemas descentralizados de mono-digestão bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim.....  | 143 |
| Figura 5.13 – Análise de sensibilidade: influência da TMA nos sistemas centralizados de co-digestão bovino-milho .....   | 144 |
| Figura 5.14 – Análise de sensibilidade: influência da TMA nos sistemas centralizados de co-digestão bovino-milho .....   | 144 |
| Figura 5.15 –Potências elétricas mínimas dos sistemas centralizados de co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim para as diferentes distâncias de deslocamento de biomassa para potências inferiores a 1.000 kWe ..... | 145 |
| Figura 5.16 – Análise de sensibilidade: influência do custo da biomassa nos sistemas de co-digestão bovino-milho .....   | 146 |
| Figura 5.17 – Análise de sensibilidade: influência do custo da biomassa nos sistemas de co-digestão bovino-capim.....  | 147 |
| Figura 5.18 – Análise de sensibilidade: influência do preço da energia elétrica nos sistemas de mono-digestão bovino .....   | 148 |
| Figura 5.19 – Análise de sensibilidade: influência do preço da energia elétrica nos sistemas de co-digestão bovino-milho .....   | 148 |
| Figura 5.20 – Análise de sensibilidade: influência do preço da energia elétrica nos sistemas de co-digestão bovino-capim .....   | 149 |
| Figura 5.21 – Potência mínima de geração de energia elétrica para os diferentes preços de venda de energia elétrica dos sistemas de mono-digestão bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim.....               | 149 |
| Figura 5.22 – Influência do tamanho e deslocamento dos substratos nos sistemas de co-digestão bovino-milho .....   | 151 |
| Figura 5.23 – Influência do tamanho e deslocamento dos substratos nos sistemas de co-digestão bovino-capim.....  | 151 |
| Figura 5.24 –Potências elétricas mínimas dos sistemas de co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim para diferentes distâncias de deslocamento de biomassa para potências superiores a 1.000 kWe .....                  | 152 |
| Figura 5.25 –Potências elétricas mínimas dos sistemas de mono-digestão bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim para diferentes subsídios do investimento.....  | 154 |

## Lista de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Propriedades do gás proveniente da Digestão Anaeróbia (AD), Aterro Sanitário e Gás Natural.....                         | 13 |
| Tabela 2.2 – Equivalências energéticas das principais “fontes energéticas” por m <sup>3</sup> de biogás a CNTP.....                  | 15 |
| Tabela 2.3 – Redução de emissões de GEE a partir de biogás gerado de diferentes substratos em relação aos combustíveis fósseis ..... | 16 |
| Tabela 2.4 – Potencial de aquecimento global “Global Warming Potential (GWP)” dos principais GEE.....                                | 16 |
| Tabela 2.5 – Exoenzimas e seus substratos .....  | 20 |
| Tabela 2.6 – Principais reações de degradação acetogênica .....  | 22 |
| Tabela 2.7 – Espécies de Archaeas formadoras de metano e seus substratos .....   | 24 |
| Tabela 2.8 – Temperatura ótima de crescimento alguns archaeas formadoras de metano.....  | 24 |
| Tabela 2.9 – Principais reações de degradação metanogênicas.....   | 25 |
| Tabela 2.10 – Tempo de regeneração de diferentes microrganismos anaeróbios em comparação com microrganismos aeróbios .....           | 28 |
| Tabela 2.11 – Requerimentos ambientais da digestão anaeróbia .....   | 30 |
| Tabela 2.12 – pH ótimo de crescimento de alguns archaeas formadoras de metano .....  | 33 |
| Tabela 2.13 – Comparação entre digestores mesofílicos e termofílicos .....   | 38 |
| Tabela 2.14 – Características das temperaturas dos processos de digestão anaeróbia .....   | 38 |
| Tabela 3.1 – Classificação dos processos para produção de biogás conforme diferentes critérios .....                                 | 45 |
| Tabela 3.2 – Potencial de produção de metano a partir de dejetos animais no Brasil.....  | 65 |
| Tabela 3.3 – Características dos principais substratos utilizados na digestão anaeróbia e descritos por diferentes autores .....     | 67 |
| Tabela 3.4 – Setores e fontes principais geradoras de gases de efeito estufa.....  | 76 |
| Tabela 3.5 – Produção de biogás no Brasil por categoria e fonte de substrato .....   | 83 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 3.6 – Resumo de alguns projetos e avaliações econômicas feitas no Brasil e alguns países europeus.....  | 85  |
| Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados para a avaliação da produção do biogás.....   | 91  |
| Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados para a avaliação da produção do biogás.....   | 93  |
| Tabela 4.3 – Parâmetros de projeto do sistema de biodigestão.....  | 95  |
| Tabela 4.4 – Parâmetros da avaliação das demandas e perdas de calor no biodigestor.....  | 98  |
| Tabela 4.5 – Parâmetros da avaliação do gasto energético no bombeamento, transportador do silo e agitação do sistema de biodigestão.....   | 99  |
| Tabela 4.6 – Consumo energético dos sistemas de remoção biológica de H <sub>2</sub> S (BiogasClean®).....  | 99  |
| Tabela 4.7 – Parâmetros de transporte de biomassa agrícola.....  | 110 |
| Tabela 4.8 – Custo dos equipamentos de uma usina de biogás com potência de 100 kWe ...   | 113 |
| Tabela 4.9 – Custo dos sistemas de remoção biológica de sulfeto de hidrogênio para diferentes fluxos de biogás (BiogasClean®).....   | 114 |
| Tabela 4.10 – Custos dos substratos e preço de venda dos produtos principais de usinas de digestão anaeróbia.....  | 115 |
| Tabela 4.11 – Premissas adotadas para a avaliação econômica.....   | 116 |
| Tabela 5.1 – Produção de biogás e metano das diferentes potências avaliadas.....   | 121 |
| Tabela 5.2 – Quantidades de esterco de gado, silagem de milho e silagem de capim utilizados para geração das respectivas potências elétricas.....  | 123 |
| Tabela 5.3 – Quantidades de cabeças de gado, área de milho e área capim necessários para geração das respectivas potências elétricas.....  | 124 |
| Tabela 5.4 – Tamanho dos principais componentes do biodigestor para as diferentes potências avaliadas.....   | 126 |
| Tabela 5.5 – Consumos de energia dos equipamentos dos sistemas de digestão anaeróbia para as diferentes potências avaliadas.....   | 129 |
| Tabela 5.6 – Resumos dos balanços de massa da mono-digestão de dejetos de esterco bovino.....  | 131 |
| Tabela 5.7 – Resumos dos balanços de massa da co-digestão de esterco bovino e silagem de milho.....  | 132 |
| Tabela 5.8 – Resumos dos balanços de massa da co-digestão de esterco bovino e silagem de capim elefante.....   | 133 |
| Tabela 5.9 – Distâncias percorridas para sistemas de e co-digestão descentralizada bovino-milho e co-digestão descentralizada bovino-capim.....  | 136 |
| Tabela 5.10 – Custos total de investimento dos diferentes sistemas de mono-digestão esterco bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim e custo de investimento de moto gerador CHP otto gás para as diferentes potências avaliadas..... | 137 |

## Lista de abreviaturas e siglas

|                    |   |
|--------------------|---|
| ABPP               | The Africa Biogas Partnership Programme “Programa Africano de Biogás”   |
| AGV                | Ácidos Graxos Voláteis  |
| ANEEL              | Agência Nacional de Energia Elétrica  |
| Batch              | Batch reator “Reatores em batelada”   |
| BMP                | Biochemical Methane Potential “Potencial Bioquímico de Metano”  |
| BRL                | Real Brasileiro (R\$)   |
| CAPES              | Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior   |
| CCC                | Conta de Consumo de Combustíveis Fósseis  |
| CED                | Culturas Energéticas Dedicadas “Dedicated Energy Crops (DEC)”   |
| CH <sub>4</sub>    | Metano  |
| CHP                | Combined Heat and Power “Sistema Combinado de calor e energia elétrica”   |
| CMP                | Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol “Conferência das Partes enquanto Reunião das Partes no Protocolo de Quioto” |
| CNPq               | Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico   |
| CNTP               | Condições Normais de Temperatura e Pressão  |
| CO <sub>2</sub>    | Dióxido de carbono  |
| CO <sub>2</sub> Eq | Dióxido de carbono equivalente  |
| COP                | Conferência das Partes  |
| COPEL              | Companhia Paranaense de Energia   |
| CQNUAC             | Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas   |
| CRC                | Clausius Rankine Cycle (Ciclo Rankine Convencional)   |
| CSTR               | Continuous Stirred Tank Reactor “Reator contínuo de mistura completa”   |
| DA                 | Digestão Anaeróbia “Anaerobic Digestion (AD)”   |
| DRANCO®            | Dry Anaerobic Composting “Compostagem Anaeróbica Seca”  |

|           |  |
|-----------|--|
| EMBRATER  | Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural                                   |
| ET        | Emission Trade “Comércio de emissões”  |
| EU        | European Union “União Europeia”  |
| EUR       | Euro (€)   |
| FAPEMIG   | Fundação de Apoio da Pesquisa do Estado de Minas Gerais                                      |
| GEE       | Gases de Efeito Estufa   |
| GLP       | Gás Liquefeito de Petróleo   |
| Gton      | Giga toneladas   |
| GWP       | Global Warming Potential “Potencial de aquecimento global”                                   |
| IBGE      | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  |
| IEA       | International Energy Agency “Agencia Internacional de Energia”                               |
| IPCC      | Intergovernmental Panel on Climate Change “Painel intergovernamental sobre mudança do clima” |
| JI        | Joint Implementation “Implementação Conjunta”  |
| MDL       | Mecanismo de Desenvolvimento Limpo “Clean Development Mechanism (CDM)”                       |
| MLBPs     | Medium and Large-Scale Biogas Plants “Usinas de biogás de médio e grande tamanho”            |
| MME       | Ministério de Minas e Energia  |
| Mtep      | Milhões de toneladas equivalentes de petróleo  |
| Mton      | Milhões de toneladas   |
| NEST      | Núcleo de Excelência em Geração Termoelétrica e Distribuída                                  |
| NPK       | Nitrogênio, Fosforo e Potássio   |
| ODS       | Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis  |
| OLR       | organic loading rate “Taxa de Carga Orgânica”  |
| ORC       | Organic Rankine Cycle (Ciclo Rankine Organico)   |
| PB        | Payback “Recuperação do Investimento”  |
| PCH       | Pequenas Centrais Hidrelétricas  |
| PCI       | Poder Calorífico Inferior  |
| PFR       | Plug flow Reactor “Reatores de fluxo pistonado”  |
| PNUD      | Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento  |
| PROBIOGÁS | Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil          |
| PROINFA   | Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica                             |
| RCE       | Redução Certificada de Emissões  |

|        |  |
|--------|--|
| RSU    | Resíduos Sólidos Urbanos   |
| SIN    | Sistema Interligado Nacional   |
| tep    | Toneladas Equivalentes de Petróleo   |
| TIR    | Taxa Interna de Desconto   |
| TMA    | Taxa Mínima de Atratividade  |
| ton    | Toneladas  |
| TRC    | Tempo de Retorno de Capital  |
| TRH    | Tempo de Retenção Hidráulica   |
| UASB   | Upflow Anaerobic Sludge Blanket “Reatores anaeróbios de fluxo ascendente”  |
| UNFCCC | United Nations Framework Convention on Climate Change” Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas” |
| UNIFEI | Universidade Federal de Itajubá  |
| USD    | Dólar Americano (US\$)   |
| VPL    | Valor Presente Líquido   |

## Lista de símbolos: letras latinas e gregas

|                     |                     |   |
|---------------------|---------------------|---|
| $\dot{M}_{AD}$      | ton/dia             | Massa de digestato  |
| $\dot{M}_{CO}$      | ton/dia             | Massa de silagens   |
| $\dot{M}_{SP+água}$ | ton/dia             | Massa de esterco bovino + água                                    |
| $\dot{M}_T$         | ton/dia             | Massa total dos substratos e co-substratos adicionado diariamente |
| $\dot{V}_{VP}$      | m <sup>3</sup> /h   | Velocidade nominal de bombeamento                                 |
| $\Delta P_{VP}$     | bar                 | Variação de pressão / pressão de carga                            |
| $h_a$               | W/m <sup>2</sup> °C | Coefficiente de transferência de calor ao exterior do biodigestor |
| $h_i$               | W/m <sup>2</sup> °C | Coefficiente de transferência de calor ao interior do biodigestor |
| $C_O$               | USD                 | Custo de referência do equipamento                                |
| $C_{USD/ton}$       | USD/ton             | Custo de transporte por tonelada                                  |
| $C_i$               | %                   | Carbono orgânico contido em cada matéria-prima                    |
| $C_{mês}$           | USD/mês             | Custo de transporte mensal  |
| $C_t$               | USD/ton             | Custo de transporte por tonelada                                  |
| $FC_t$              | USD                 | Fluxos de caixa individuais                                       |
| $I_1$               | USD                 | Custo total investimento do sistema mono-digestão esterco         |
| $I_2$               | USD                 | Custo total investimento do sistema co-digestão bovino-milho      |
| $I_3$               | USD                 | Custo total investimento do sistema co-digestão bovino-capim      |
| $I_{CHP}$           | USD                 | Custo de investimento do moto gerador CHP otto gás                |
| $M_O$               | kWe                 | Tamanho de referência do equipamento                              |
| $N^o_{mês}$         | -                   | Quantidade de viagens por mês                                     |
| $N_i$               | %                   | Nitrogênio orgânico contido em cada matéria-prima                 |
| $P_{VP}$            | kW                  | Potência da bomba   |
| $Q_{Perdido}$       | kWh/a               | Calor perdido nas superfícies do biodigestor                      |
| $Q_{SU}$            | kWh/a               | Calor requerido para aquecer o substrato                          |
| $Q_i$               | ton                 | Peso fresco de cada matéria                                       |
| $Q_{ton/mês}$       | ton/mês             | Quantidade de co-substrato transportado por mês                   |
| $\bar{R}$           | km                  | Distância média de transporte de silagem                          |
| $R_1$               | m <sup>3</sup> /ton | Rendimento de biogás do substrato ou co-substrato 1               |

|             |  |  |
|-------------|--|--|
| $R_2$       | $m^3/\text{ton}$                           | Rendimento de biogás do substrato ou co-substrato 2        |
| $R_T$       | $m^3/\text{ton}$                           | Rendimento de biogás da mistura                            |
| $R_{max}$   | km   | Distância máxima em torno da usina                         |
| $R_n$       | $m^3/\text{ton}$                           | Rendimento de biogás do substrato ou co-substrato n        |
| $T_1$       | $^{\circ}\text{C}$                         | Temperatura exterior do biodigestor                        |
| $T_2$       | $^{\circ}\text{C}$                         | Temperatura interior do biodigestor                        |
| $V_{AD}$    | $m^3$                                      | Volume de tanque de armazenamento de digestato             |
| $V_{BD}$    | $m^3$                                      | Volume do biodigestor                                      |
| $V_{BD}$    | $m^3$                                      | Volume do biodigestor                                      |
| $V_{PT}$    | $m^3$                                      | Volume de tanque de preparação                             |
| $V_S$       | $m^3$                                      | Volume de silo   |
| $d_1$       | $m^2$                                      | Espessura de isolante 1                                    |
| $d_2$       | $m^2$                                      | Espessura de isolante 2                                    |
| $f_{AD}$    | -  | Fator de projeto para tanque de armazenamento de digestato |
| $f_{BD}$    | -  | Fator de projeto para o biodigestor                        |
| $f_{PT}$    | -  | Fator de projeto para tanque de preparação                 |
| $f_S$       | -  | Fator de projeto para silo                                 |
| $k_1$       | $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$   | Condutividade térmica do isolante 1                        |
| $k_2$       | $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$   | Condutividade térmica do isolante 2                        |
| $m_t$       | $\text{ton}/\text{h}$                      | Fluxo de massa de mistura de substrato                     |
| $t_B$       | h  | Tempo de bombeamento / carga completa                      |
| $x_1$       | -  | Fração em massa do substrato ou co-substrato 1             |
| $x_2$       | -  | Fração em massa do substrato ou co-substrato 2             |
| $x_n$       | -  | Fração em massa do substrato ou co-substrato n             |
| $\eta_{el}$ | %  | Eficiência elétrica  |
| $\eta_{th}$ | %  | Eficiência térmica   |
| $\omega$    | kWe  | Potência elétrica do sistema                               |
| $A$         | $m^2$                                      | Área de transferência de calor                             |
| $B$         | USD  | Valor presente das receitas / benefícios                   |
| $BL$        | USD  | Benefício líquido periódico                                |
| $C$         | USD  | Valores presentes dos custos de investimento e operação    |
| $C$         | USD  | Custo e tamanho do equipamento a avaliar                   |
| $C:N$       | -  | Relação carbono e nitrogênio                               |
| $CF$        | USD/mês                                    | Custo fixo de transporte                                   |
| $CV$        | USD/km                                     | Custo variável por quilômetro                              |
| $C_p$       | $\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ | Calor específico de substrato                              |
| $I$         | USD  | Investimento inicial                                       |
| $K$         | -  | Relação carbono e nitrogênio da mistura de matérias-primas |

|            |                     |   |
|------------|---------------------|---|
| <i>KM</i>  | km                  | Distância percorrida por mês                      |
| <i>M</i>   | kWe                 | Tamanho do equipamento a avaliar                  |
| <i>Q</i>   | ton/a               | Quantidade requerida de matéria-prima (silagem)   |
| <i>TR</i>  | dia                 | Tempo de retenção para cada componente            |
| <i>TRH</i> | dia                 | Tempo de retenção hidráulica                      |
| <i>U</i>   | W/m <sup>2</sup> °C | Coefficiente global de transferência de calor     |
| <i>d</i>   | km                  | Distância de transporte de co-substrato           |
| <i>f</i>   | -                   | Fração de superfície disponível ao redor da usina |
| <i>i</i>   | %                   | Taxa Mínima de Atratividade                       |
| <i>n</i>   | -                   | Número de períodos envolvidos no fluxo de caixa   |
| <i>y</i>   | ton/ha              | Rendimento de produção da silagem                 |
| <i>η</i>   | -                   | Eficiência do sistema de bombeamento              |
| <i>ρ</i>   | ton/m <sup>3</sup>  | Densidade dos substratos/co-substratos            |
| <i>τ</i>   | -                   | Fator de tortuosidade                             |

## Capítulo 1.

# INTRODUÇÃO

Atualmente, existe em nível global, uma grande preocupação com os impactos ambientais como acidificação, esgotamento de recursos, material particulado e as mudanças climáticas gerados principalmente, pela utilização de combustíveis fósseis [1,2]. A dependência da utilização de combustíveis fósseis chegou a tal magnitude, que a matriz energética, em nível mundial, está principalmente baseada na utilização de fontes não renováveis de energia que incluem petróleo, carvão e gás natural, com somente 13,7% da participação de fontes renováveis de energia [3]. Este consumo indiscriminado de combustível fóssil se vê influenciado pelo crescimento populacional<sup>1</sup>, o qual por sua vez, demanda de energia elétrica e serviços para seu desenvolvimento dentro da sociedade, sendo assim, o consumo energético em nível mundial se duplicou nos últimos 20 anos, passando de 4.667 Mtep em 1973 a 9.301 Mtep em 2013 [3].

É possível que a demanda mundial de energia continue se incrementando nos próximos anos, o que pode agravar o atual problema ambiental existente, caso não se consiga mudar a matriz energética de maneira efetiva. No entanto, as previsões da Agencia Internacional de

---

<sup>1</sup> População mundial ao 2013 foi de 7.118 milhões de pessoas [3].

Energia (IEA por suas siglas em inglês) para um cenário 450S<sup>2</sup>, consideram que para o ano 2040 a oferta de energia primaria seria de 10.748 Mtep, enquanto as emissões geradas pela combustão de combustíveis fósseis seriam de 19.300 Mton de CO<sub>2</sub>Eq<sup>3</sup> [3]. O Cenário baixo em oferta de energia e emissões de dióxido de carbono proposto pela IEA só poderá ser possível, além da vontade política, se houver possibilidade de melhorar o consumo de energia pela população (uso racional), desenvolvimento de processos de conversão de energia mais eficientes (eficiência energética) e principalmente, no uso das energias limpas (energias renováveis) [4]. Contudo, as projeções feitas pelo Painel Intergovernamental Sobre Mudanças do Clima (da sua denominação em inglês Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) indicam que o aquecimento induzido pelo dióxido de carbono permanecerá aproximadamente constante durante muitos séculos, mesmo depois cessar completamente as emissões antropogênicas [5].

A utilização e desenvolvimento de tecnologias para a utilização de energias limpas, tais como a biomassa e o biogás, pode ajudar a mitigar os efeitos das mudanças climáticas existentes, as quais estão diretamente ligadas ao acréscimo na emissão de gases de efeito estufa (dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos nitrosos, metano, etc.) na atmosfera, os quais continuarão incrementando-se significativamente, se não forem tomadas medidas efetivas para sua redução [6]. Atualmente, o desenvolvimento deste tipo de tecnologias encontra-se alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS)<sup>4</sup> do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), que dentro dos 17 ODS alberga os objetivos referente ao uso sustentável da energia e ao combate contra mudança do clima e os seus impactos (objetivos 7 e 13, respetivamente) [7,8]. Sendo assim, o alinhamento com os ODS pode ajudar a desenvolver tecnologias baseadas na utilização de energias renováveis e biogás para garantir a segurança energética, e sua introdução na matriz energética do país, a médio prazo [9].

O Brasil é um país que tem uma das matrizes energéticas mais limpas em nível mundial, embora, a percentagem da participação dos recursos renováveis tenha diminuído nos últimos

---

<sup>2</sup> Com base em políticas necessárias para limitar o aumento da temperatura média global a 2°C e estabilizar a concentração de gases de efeito estufa globais de longo prazo em 450 ppm de CO<sub>2</sub>Eq [3,209]. (Concentração de CO<sub>2</sub>Eq ao ano 2011 foi de 390,46 ppm [210]).

<sup>3</sup> A oferta de energia primaria e as emissões por combustão de combustíveis baseados em balancés de energia da IEA ao ano 2013 foram de 13.541 Mtep e 32.190 Mton de CO<sub>2</sub>Eq respetivamente [3].

<sup>4</sup> Documento “Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável” aprovado em setembro de 2015.

10 anos, pela menor oferta de energia hidráulica devido à crises hídrica e à maior oferta de gás natural, sendo que a participação dos renováveis para o ano 2014 foi somente de 39,4% [10]. No entanto, a matriz de energia elétrica Brasileira ainda tem 74,6% de participação de fontes renováveis, hidráulica, biomassa e eólica, tendo uma intensidade de carbono na geração de energia elétrica brasileira para o ano 2014, de 137 kg CO<sub>2</sub>Eq por cada MWh gerado, emitindo dióxido de carbono 5 vezes menos do que o setor elétrico europeu, 6 vezes menos do que o setor elétrico americano e 9 vezes menos do que o chinês [10,11]. No entanto, a participação da biomassa dentro da matriz de energia elétrica representa só 7,3%, compreendendo para abril de 2016 um total de 523 usinas de biomassa em operação, existindo majoritariamente usinas de queima de bagaço de cana de açúcar; do total das usinas de biomassa 10 usinas geram biogás a partir de resíduos animais e 14 usinas geram biogás a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) com potências instaladas de 1.924 kW e 83.699 kW, respectivamente [12].

No Brasil, o setor energético produz o 37% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), sendo que 96% (428,3 Mton CO<sub>2</sub>Eq) é atribuído à queima de combustíveis. No entanto, o setor agropecuário também tem um elevado aporte de GEE, representando 37% das emissões totais do país, dos quais 60,7% (270,8 Mton CO<sub>2</sub>Eq)<sup>5</sup> são atribuídos à fermentação entérica e ao manejo de dejetos animais [13]. Nesse cenário, as metas globais de prevenção da poluição, os objetivos do protocolo de Quioto, questões importantes relacionados à saúde humana e animal e segurança alimentar, exigem soluções cada vez mais sustentáveis para o manuseio e reciclagem de esterco animal e resíduos orgânicos, onde o biogás a partir de co-digestão anaeróbia de estrume animal, combinada com tecnologias de tratamento pré e pós, desempenham um crescente papel importante [14].

Nesse sentido, a atividade agroindustrial caracteriza-se por apresentar grande potencial aplicação da tecnologia da biodigestão. São exemplos dessas atividades, as destilarias de álcool, cervejarias, indústrias de suco cítrico, abatedouros, etc. [15]. Sendo assim, a exploração digestão anaeróbia (DA) de dejetos animais têm potencial significativo para capturar o metano como fonte de energia renovável e, como consequência, para reduzir as emissões de GEE [16]. Por outro lado, tradicionalmente a DA tem utilizado esterco animal como única matéria-prima

---

<sup>5</sup> As emissões globais de GEE a partir da criação de gados são estimadas em 7,1 Gton de CO<sub>2</sub>Eq por ano, representando o 14,5% de todo das emissões antropogênicas no mundo [16].

na maioria dos biodigestores com a finalidade de produzir biogás para geração de energia elétrica. No entanto, a utilização de esterco como único substrato (mono-substrato) tem sido reconhecido como pouco conveniente e não pode representar a forma mais eficiente para a produção de biogás, devido à sua deficiência inerente de carbono (baixa relação carbono/nitrogênio) [17,18]. Além disso, a produção de biogás a partir de estrume de animais como mono-substrato tem um rendimento relativamente baixo na produção de biogás, podendo, em alguns casos, não ser economicamente viável, por depender do uso da energia gerada [19].

Até há algum tempo, a digestão anaeróbia nos países europeus tinha a característica de utilizar um único substrato (mono-substrato), mas hoje em dia, os limites e as possibilidades da DA são mais conhecidos e a co-digestão<sup>6</sup> de substratos com um alto conteúdo de biogás está tornando-se assim uma tecnologia padrão e, além de incrementar a produção de biogás, mas acima de tudo, pode aumentar a renda das plantas de biogás [19]. Tradicionalmente, os resíduos orgânicos, lodos e águas residuais foram utilizados como substratos na digestão anaeróbia, mas recentemente, plantas de DA para geração de energia foram estabelecidas utilizando culturas energéticas dedicadas (CED) como cereais (por exemplo, milho, triticale<sup>7</sup>), beterraba, capim elefante, tanto como mono substrato e co-substrato, alguns destes na forma de silagem, garantindo a estabilização do ácido láctico que é o precursor da formação do metano [20,21]. Estas culturas energéticas dedicadas ricas em carbono utilizadas como co-substratos conjuntamente com estrume de suíno ou gado podem incrementar a produção de biogás significativamente [22,23]. Além disso, as CED como as silagens, especialmente a silagem de milho e a silagem de capim elefante, podem garantir um fornecimento constante à usina centralizada de biogás, já que podem ser armazenados durante todo o ano, além do fato que o milho é uma das culturas mais espacialmente homogênea e disponível em nível mundial [24].

No Brasil, o aproveitamento dos dejetos animais, principalmente de gado bovino e suíno, podem constituir um potencial superior a 50 milhões de metros cúbicos de metano por dia [25], sendo que o potencial de metano produzido a partir da digestão anaeróbia de esterco bovino

---

<sup>6</sup> Co-digestão é a digestão simultânea de uma mistura homogênea de dois ou mais substratos.

<sup>7</sup> Cereal híbrido, resultado da hibridação de duas espécies distintas, o trigo (*Triticum aestivum* L.) e o centeio (*Secale cereale* L.).

criado intensivamente constitui mais do 12,16% do total de metano atribuídos aos dejetos animais no Brasil, enquanto os dejetos suínos somente constituem 4,50%.

Embora a digestão anaeróbia no Brasil tenha crescido nos últimos anos, segue sendo orientada à utilização de dejetos animais produzidos nas mesmas fazendas, principalmente dejetos bovinos, sendo necessário para melhorar o aproveitamento do biogás a partir de resíduos agropecuários considerar-se também a possibilidade de implementação de plantas de DA centralizadas, aptas para utilizar diferentes tipos de substratos (co-digestão) [25]. No entanto, se desconhecem, no contexto brasileiro, quais condições da utilização de co-substratos poderiam incrementar as rendas de uma usina de biogás [19].

Neste contexto, o trabalho de pesquisa realizado faz uma avaliação técnica da utilização do co-substratos, tais como silagens de milho e silagens de capim elefante em co-digestão com esterco bovino, nos sistemas de digestão anaeróbia centralizada em comparação com sistemas de digestão descentralizada com a finalidade de gerar energia elétrica, tendo em consideração cenários possíveis de geração de energia para diferentes tamanhos de usinas e distâncias de transporte de co-substratos. Finalmente, faz-se uma análise econômica dos diferentes cenários que permita conhecer qual cenário, centralizado ou descentralizado, para as variáveis analisadas, seria o ótimo tendo em consideração os indicadores econômicos avaliados.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar técnica e economicamente as alternativas de produção centralizada e descentralizada de biogás proveniente da digestão anaeróbia no contexto brasileiro, visando a geração de energia elétrica e utilizando esterco bovino como substrato base e silagens de milho e de capim elefante como co-substratos.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

Constituem-se em objetivos específicos:

- Analisar os principais parâmetros técnicos que podem influenciar na produção de biogás no contexto da utilização de co-substratos.
- Dimensionar sistemas de biodigestão anaeróbia de diferentes tamanhos baseados nas potências de geração de energia elétrica, tendo em conta a utilização de co-substratos que podem influenciar na produção de biogás.
- Propor cenários de avaliação baseados em critérios de produção de biogás centralizados e descentralizados, tendo em conta parâmetros técnicos e distâncias para o transporte de co-substratos necessários para realizar a co-digestão anaeróbia.
- Analisar os principais aspectos econômicos dos diferentes cenários de digestão anaeróbia visando a comparar as vantagens ou desvantagens dos sistemas de produção centralizados e descentralizados, tendo em consideração o tamanho da usina de biogás e as distâncias de transporte de co-substratos.
- Realizar uma análise de sensibilidade dos principais parâmetros que possam ter influência direta na análise econômica, com ênfase no custo de aquisição e custo de transporte dos co-substratos.

## **1.2. Escopo e limitações**

No presente trabalho de dissertação, realizou-se a avaliação técnica e econômica dos sistemas de digestão anaeróbia centralizado e descentralizado no Brasil visando a geração de energia elétrica. Partindo disso, os dados apresentados para realizar as avaliações técnicas e econômicas são em sua maioria dados de referências de outros autores feitos para o contexto brasileiro. No entanto, alguns dados são obtidos de outras fontes para outros contextos e realidades; portanto, para se ter uma aproximação mais exata da realidade, visando a instalação

de um projeto real, é necessário avaliar e obter dados de maneira mais exata e, em alguns casos, de maneira experimental.

Embora a pesquisa considere a co-digestão de substratos para produção de biogás tendo em conta alguns parâmetros que possam limitar os processos de digestão anaeróbia, estes processos são muito mais complexos e não se limitam só a algumas variáveis. Portanto, a pesquisa feita envolve a avaliação dos parâmetros para digestão anaeróbia de uma maneira mais geral, tentando avaliar sistemas genéricos de produção de biogás centralizado e descentralizado com a finalidade de realizar uma análise econômica dos mesmos.

Partindo destas considerações, a pesquisa feita tenta servir como ponto de partida para o desenvolvimento de trabalhos futuros no tema de utilização de culturas energéticas dedicadas, como o milho ou capim, nas formas de silagem em sistemas de digestão centralizadas, tendo em consideração que outros países já desenvolveram tecnologias nesse sentido, e o Brasil ainda tem um longo caminho por percorrer.

### **1.3. Estrutura do trabalho**

No capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica concernente e o estado da arte da digestão anaeróbia com foco nos processos bioquímicos envolvidos. Além disso, são apresentados os principais parâmetros que poderiam influenciar na digestão anaeróbia e que tem relação com a co-digestão de substratos utilizados nos sistemas centralizados de digestão anaeróbia.

O capítulo 3 apresenta o estado atual das tecnologias existente para os processos da digestão anaeróbia, tendo em conta os critérios de seleção para um melhor aproveitamento dos substratos utilizados. Também apresenta o “conceito” dos sistemas de digestão anaeróbia centralizada, assim como as principais matérias primas utilizadas. Além disso, finalmente é apresentado um resumo da digestão anaeróbia no Brasil e alguns países do mundo, tentando conhecer o estado atual do avanço da digestão anaeróbia, características técnicas, investimento e subsídios recebidos.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia de pesquisa, onde se descrevem as características que consideradas para realizar a avaliação técnica e análise econômica. A avaliação técnica pretende estudar os principais parâmetros que possam limitar e definir os sistemas de produção de biogás centralizado e descentralizado. Além de definir os balanços de matéria, energia e dimensionar os sistemas, os quais são avaliados economicamente de acordo com os cenários estabelecidos, são feitas também, análises de sensibilidade dos principais parâmetros que possam influenciar na rentabilidade.

No capítulo 5, apresentam-se os resultados da avaliação técnico-econômica dos sistemas de digestão anaeróbia centralizada e descentralizada, tentando chegar a uma discussão crítica dos resultados obtidos. Também é apresentada a análise de sensibilidade dos parâmetros que influenciam diretamente na viabilidade econômica dos projetos de digestão anaeróbia nas condições propostas, tais como a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), os preços dos substratos e os preços de venda de energia. Além disso, são apresentadas outras opções de configurações, nas quais projetos de digestão anaeróbia possam ser rentáveis, tendo em considerações o fator de escala destes projetos.

Finalmente, no capítulo 6, apresentam-se as conclusões e recomendações de propostas para futuras pesquisas a partir da experiência obtida no desenvolvimento da presente dissertação. Além disso, nos anexos se apresentam informações adicionais que podem ajudar como fonte de informação e base de dados para o tema em contexto.

## Capítulo 2.

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Biogás e digestão anaeróbia

O biogás, como seu nome indica, é um gás de origem biológica produzido quando a matéria orgânica é decomposta em condições anaeróbias<sup>8</sup>, formando uma mistura de gases na qual os principais componentes são o metano e dióxido de carbono, além de traços de nitrogênio, hidrogênio e monóxido de carbono [26,27]. A obtenção do biogás é um processo que ocorre nos pântanos, fundo dos lagos, esterqueiras, no rúmen dos animais (fermentação entérica de bovinos) e matéria orgânica decomposta no ambientes anóxicos no fundo do mar [28,29].

Os processos de digestão anaeróbia, são praticados por muitos anos e provêem soluções para o tratamento de resíduos, recuperação de nutrientes e potencial geração de energia, podendo gerar calor e energia elétrica, além de gerar benefícios econômicos e ambientais [30]. A digestão anaeróbia consiste na decomposição da matéria orgânica em condições onde não há oxigênio, tendo como produto principal o biogás, majoritariamente metano, e um subproduto

---

<sup>8</sup> Sem oxigênio, mas com a presença de nitratos como acceptor de elétrons

líquido chamado biofertilizante, que tem propriedades de incrementar os rendimentos das culturas e melhoria do solo [31].

O processo de biodigestão pode ocorrer de maneira natural em certas condições, tal como ocorre nos pântanos, e no processo de produção do gás natural que é extraído da terra e cuja formação leva milhões de anos em condições anaeróbias. O biogás é diferente do gás natural na medida em que é uma fonte renovável de energia produzida biologicamente por meio de digestão anaeróbia, em vez de um combustível fóssil produzido por processos geológicos [32].

### **2.1.1. História do biogás**

Antigamente, na Assíria, por volta do século 10 A.C., o biogás foi usado como combustível para o aquecimento da água nos banhos das pessoas notáveis, sendo que o processo de digestão anaeróbia, também pode muito bem ter sido utilizada na antiga China para o tratamento de resíduos sólidos [33]. Só foi, até vários séculos depois, que um físico Italiano de nome Alessandro Volta, no ano 1776, descobriu metano “ar combustível” no gás dos pântanos, formado por sedimentos de matéria orgânica no fundo dos lagos e rios [34,35].

Em 1806 na Inglaterra, um cientista de nome Humphrey Davy identificou um gás rico em carbono e dióxido de carbono como produto da decomposição de dejetos animais em lugares úmidos. No entanto, podem ser encontrados tentativas de aproveitar a biomassa em meados do século XIX, com biodigestores instalados em Nova Zelândia e Índia. Neste último país, foi construído, em 1857, em Bombaim, a primeira instalação operacional destinada a produzir gás combustível para um hospital de idosos [35]. Em 1876, Herter reportou que o acetato, encontrado em águas residuárias, forma de maneira estequiométrica metano e dióxido de carbono<sup>9</sup> em quantidades iguais [36]. Em 1890 Donald Cameron construiu um biodigestor alimentado por lodo de esgoto na cidade de Exeter, no Reino Unido, para abastecer lâmpadas das ruas da cidade [33].

---

<sup>9</sup> Estudos feitos depois modificaram a teoria de Herter, já que o acetato é somente precursor de metano, sendo o dióxido de carbono proveniente de outras reações.

Foi somente no final do século XIX e início do século XX que se começou a explorar a técnica de como utilizar o gás produzido do processo de biodigestão, sendo que pesquisadores da Fisher e Schrader, na Alemanha e França, estabeleceram as bases teóricas e experimentais da digestão anaeróbia, o que levou, na Alemanha, por volta de 1920 ao desenvolvimento de um biodigestor para o tratamento de esgotos residenciais conhecido como tanque Imhoff, nome de seu inventor Karl Imhoff [29,35].

Em 1910, Sohngen verificou que as fermentações de materiais orgânicos produzem compostos reduzidos, tais como hidrogênio, ácido acético e gás carbônico. Demonstrou também que ocorre a redução de CO<sub>2</sub> para a formação de metano e assumiu que o ácido acético é descarbonizado para fermentação de metano. Em 1914, Thum e Reichle concluíram que o processo se dava em duas fases: ácida e metânica. Em 1916, Imhoff, denominou de digestão ácida e digestão metânica as fases do processo. Em 1940, Barker isolou a *Methano Bacterium Omelianski* que oxida etanol, a acetato e a metano. Em 1948, Buswell e Sollo, utilizando carbono 14, provaram que o metano vindo do acetato não ocorre através de redução de CO<sub>2</sub>. Em 1956 Jerris verificou que 70% do metano produzido vinha do acetato. Em 1967 Briant publicou que existem 2 espécies de bactérias que convertem a metano: uma pela via do acetato e outra pelo hidrogênio [34,37].

Depois da segunda década do século XX, China e Índia foram os países que mais aproveitaram o processo de biodigestão anaeróbia para a geração de biogás a partir do esgoto humano, com a ideia inicial de reduzir a contaminação ambiental gerada pelo esgotamento. No entanto, a crise no petróleo nos anos 70 fez que o preço da energia subisse e com ele a necessidade de aproveitamento do biogás gerado [33,38]. Na década de 70 e primeira metade da década de 80, o estudo sobre o biogás foi aprimorado por muitos países pela preocupação energética desse tempo, foi assim que na África e América Latina se construíram os primeiros biodigestores [33]. No Brasil, a Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMBRATER) foi a instituição que fomentou a construção de biodigestores rurais por meio do “projeto biogás”, que em sua primeira fase, até 1983, foram construídos 3.000 biodigestores, esperando-se implantar 9.000 unidades em todo Brasil [35,39].

Nos finais de 2010 a China tinha construído cerca de 40 milhões de biodigestores tamanho familiar, com uma produção total de 13,90 mil milhões de m<sup>3</sup> (9,93 milhões de toneladas de

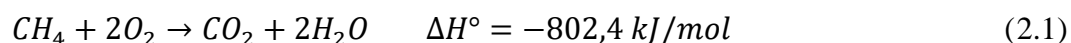
carvão padrão), sendo mais do 90% dos biodigestores construídos do tipo Chinês e para uso rural doméstico, com concreto e tijolos, com volumes de 6, 8 e 10 m<sup>3</sup>, usando principalmente estrume animal como substrato [38].

No Brasil houve um crescimento no mercado dos biodigestores em meados do ano 2000, com o advento do mercado de créditos de carbono, o qual mobilizou recursos para a construção de biodigestores, em especial em propriedades rurais com criação de suínos de médio e grande porte, visando à coleta e combustão do biogás. Na atualidade, no Brasil encontra-se em andamento o Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (PROBIOGÁS), o qual tem como objetivo central a ampliação do aproveitamento energético do biogás no Brasil trabalhando em duas áreas temáticas: sistemas de tratamento de efluentes e de resíduos sólidos [40].

### 2.1.2. Características físicas e químicas do biogás

A composição do biogás pode variar dependendo do tipo de processo, matéria-prima utilizada e outros fatores, mas em geral encontra-se nos intervalos de 50-80% de metano, 20-40% de dióxido de carbono [41,42]. Na Tabela 2.1 pode-se observar as características do biogás produzido a partir da digestão anaeróbia comparado com o biogás proveniente do aterro sanitário e gás natural, a letra “N” dentro das unidades significa que as propriedades se encontram a condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

O metano pode ser usado como uma fonte de combustível, ele é um gás inflamável, inodoro e de queima limpa (vide Equação 2.1) [36,43,44]. Assim, o biogás pode ser utilizado diretamente para produção de calor e também pode ser queimado para geração de energia elétrica [41,44].



Quando o metano, com poder calorífico médio de 35,88 MJ/m<sup>3</sup>, encontra-se misturado com dióxido de carbono, como é produzido em um digestor anaeróbio, o seu poder calorífico diminui significativamente, isto também depende do processo pelo qual se obtém o biogás

[36,45,46]. Se a fração de dióxido de carbono no biogás aumenta até valores superiores a 30%, a concentração de ácido aumenta e o valor de pH cai abaixo de 7,0; são nesses valores de pH que ocorre uma significativa fermentação de ácidos [43]. Na Figura 2.1 pode-se verificar como é a variação do poder calorífico inferior em função do conteúdo de metano, para diferentes quantidades de vapor de água.

Tabela 2.1 – Propriedades do gás proveniente da Digestão Anaeróbia (AD), Aterro Sanitário e Gás Natural

| Parâmetros                          | Unidade             | Biogás de        |           |             |
|-------------------------------------|---------------------|------------------|-----------|-------------|
|                                     |                     | aterro sanitário | Biogás AD | Gás natural |
| Poder calorífico inferior (PCI)     | MJ/Nm <sup>3</sup>  | 16               | 23,3      | 40          |
|                                     | kWh/Nm <sup>3</sup> | 4,4              | 6,5       | 11          |
|                                     | MJ/kg               | 12,3             | 20,2      | 48          |
| Densidade                           | kg/Nm <sup>3</sup>  | 1,3              | 1,2       | 0,83        |
| Índice Wobbe superior               | MJ/Nm <sup>3</sup>  | 18               | 27        | 55          |
| Número de metano                    |                     | >130             | >135      | 72          |
| Metano                              | vol-%               | 45               | 65        | 89          |
| Metano, intervalo                   | vol-%               | 35-65            | 60-70     | -           |
| Hidrocarbonetos de cadeia longa     | vol-%               | 0                | 0         | 10          |
| Hidrogeno                           | vol-%               | 0-3              | <1        | 0           |
| Monóxido de carbono                 | vol-%               | 0                | 0         | 0           |
| Dióxido de carbono                  | vol-%               | 40               | 35        | 0,9         |
| Dióxido de carbono, intervalo       | vol-%               | 15-50            | 30-40     | -           |
| Nitrogênio                          | vol-%               | 15               | <2        | 0,3         |
| Nitrogênio, intervalo               | vol-%               | 5-40             | -         | -           |
| Oxigênio                            | vol-%               | 1                | <2        | 0           |
| Oxigênio, intervalo                 | vol-%               | 0-5              | -         | -           |
| Sulfeto de hidrogênio               | ppm                 | <100             | <500      | 3           |
| Sulfeto de hidrogênio, intervalo    | ppm                 | 0-100            | 0-4000    | 1-8         |
| Amônia                              | ppm                 | 5                | 100       | 0           |
| Total de cloro como Cl <sup>-</sup> | mg/Nm <sup>3</sup>  | 20-200           | 0-5       | 0           |

Fonte: adaptado de [47,48,49]

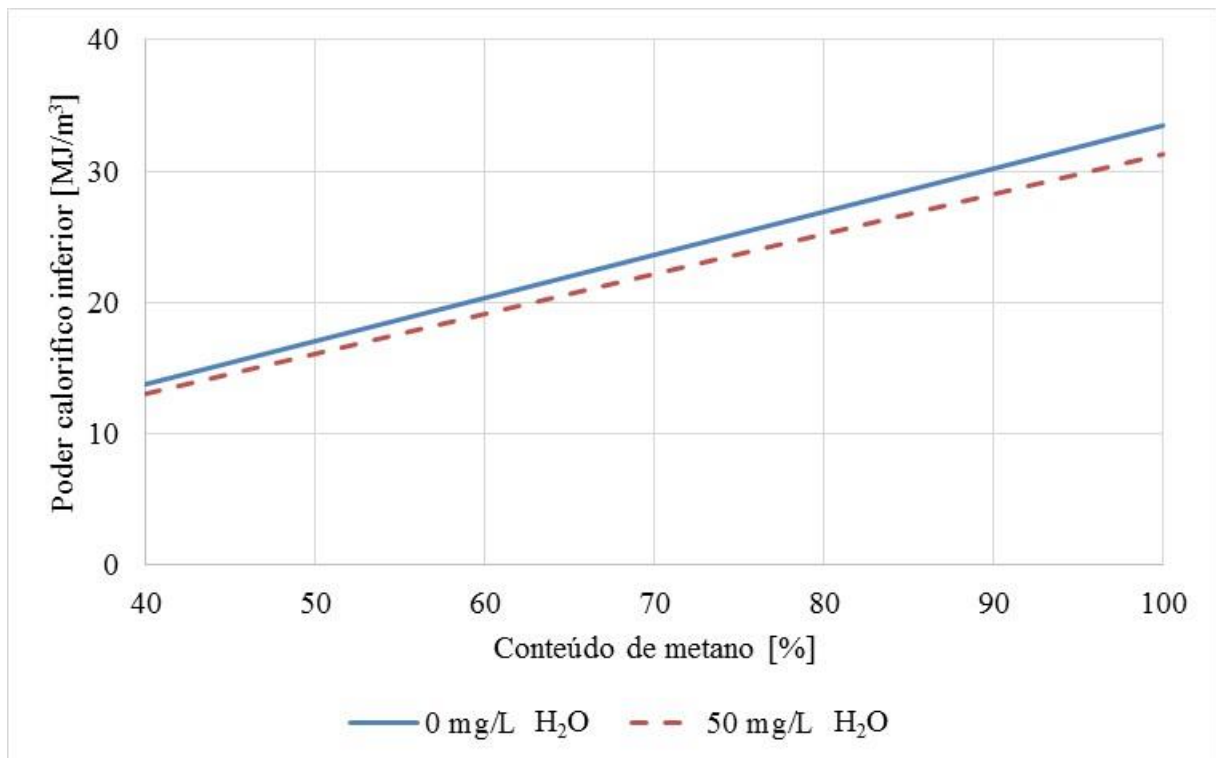


Figura 2.1 – Variação do poder calorífico inferior como uma função do conteúdo de metano e vapor de água

Fonte: adaptado de [45,46]

### 2.1.3. Equivalências energéticas

A quantidade ou o volume de biogás é normalmente expressa em "metros cúbicos normais" ( $\text{Nm}^3$ ), este é o volume de gás a  $0^\circ \text{C}$  e à pressão atmosférica. O valor energético é expresso em joule (MJ) ou watt horas (Wh). Metano puro tem um valor de energia de  $9,81 \text{ kWh/Nm}^3$ . O valor energético do biogás varia entre  $4,5$  e  $8,5 \text{ kWh/Nm}^3$ , dependendo das quantidades relativas de metano, dióxido de carbono e outros gases presentes. Assim, se há 65% de metano no biogás, o teor de energia é aproximadamente  $6,5 \text{ kWh/Nm}^3$  [49].

A energia contida no biogás pode ser utilizada para diferentes atividades, tais como a geração de energia elétrica, iluminação, uso direto nos motores de combustão interna para geração de trabalho mecânico e funcionamento de equipamentos, para cocção de alimentos, entre outros. Segundo Jaime Marti [50], o biogás produzido pela digestão anaeróbia pode ser

utilizado como substituto da lenha ou gás liquefeito de petróleo (GLP). Além disso, pode ser utilizado na iluminação com um consumo de 90 – 130 litros por hora, dependendo, do fornecedor da tecnologia e da potência do aparelho. Na Tabela 2.2 podem ser observadas as equivalências energéticas para as principais fontes energéticas por volume de biogás a CNTP. As variações dos diferentes autores basicamente são devidas às considerações prévias, tais como teor de metano, poder calorífico das fontes energéticas, eficiência da conversão elétrica e fatores de padronização dos combustíveis que podem ser temporais.

Tabela 2.2 – Equivalências energéticas das principais “fontes energéticas” por m<sup>3</sup> de biogás a CNTP

| Parâmetros          | Unidade        | Nogueira<br>(1986)<br>[35] | Marti<br>(2008)<br>[50] | Cortez et al<br>(2008)<br>[15] | Lora et al<br>(2012)<br>[51] | Elaboração própria<br>baseado em<br>[11,52,53,54,55,56,57] |
|---------------------|----------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------------|--|
| Lenha               | kg             | 3,5                        | -                       | 1,53                           | 3,5                          | 1,80   |
| Capim elefante      | kg             | -                          | -                       | -                              | -                            | 1,33 <sup>a</sup>  |
| GLP                 | kg             | 1,43                       | -                       | 0,46                           | 0,40-1,43                    | 0,50   |
| Gás Natural         | m <sup>3</sup> | -                          | 0,76                    | -                              | -                            | 0,71   |
| Metano              | m <sup>3</sup> | -                          | -                       | -                              | -                            | 0,65   |
| Álcool anidro       | L              | 0,8                        | 1,1                     | 0,79                           | 0,8                          | 0,97 (1,02) <sup>b</sup>                                   |
| Gasolina            | L              | 0,61                       | 0,75                    | 0,61                           | 0,61-0,70                    | 0,67 (0,73) <sup>c</sup>                                   |
| Óleo diesel         | L              | 0,55                       | 0,65                    | 0,56                           | 0,55                         | 0,61   |
| Biodiesel<br>(B100) | L              | -                          | -                       | -                              | -                            | 0,65   |
| Carvão mineral      | kg             | 0,74                       | 0,7                     | -                              | 0,74                         | 1,07 <sup>d</sup>  |
| Carvão vegetal      | kg             | 0,80                       | -                       | 0,74                           | -                            | 0,86   |
| Xisto               | kg             | 4,0                        | -                       | 3,45                           | -                            | 3,71   |
| Eletricidade        | kWh            | -                          | 2,2                     | 1,43                           | 1,25-1,43                    | 2,19   |

a: Capim elefante para um PCI de 4.200 kcal/kg

b: Álcool hidratado

c: Gasolina tipo C (Gasolina comercializada nos postos de serviços e que recebe a adição de etanol anidro nas distribuidoras, no percentual determinado pela legislação federal)

d: Carvão mineral 5200

Fonte: adaptado de [11,15,35,50,51,52,53,54,55,56,57]

### 2.1.4. Benefícios ambientais

O ganho real na redução dos GEE quando os combustíveis fósseis são substituídos por biogás depende do substrato utilizado. É possível reduzir a emissão de GEE em mais do 100%, em relação aos combustíveis fósseis, incluindo, por exemplo, a diminuição da necessidade de fertilizantes químicos (vide Tabela 2.3) [47].

Tabela 2.3 – Redução de emissões de GEE a partir de biogás gerado de diferentes substratos em relação aos combustíveis fósseis

| Substrato                               | (%) |
|---|-----|
| Capim                                   | 86  |
| Beterraba (incluindo partes superiores) | 85  |
| Milho                                   | 75  |
| Estrume                                 | 148 |
| Resíduos da indústria de alimentos      | 119 |
| Lixo orgânico doméstico                 | 103 |

Fonte: [47]

Tabela 2.4 – Potencial de aquecimento global “Global Warming Potential (GWP)” dos principais GEE

| Parâmetros            | Formula química                  | GWP                         |         |          |          |
|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------|----------|----------|
|                       |                                  | SAR <sup>a</sup> (100 anos) | 20 anos | 100 anos | 500 anos |
| Dióxido de carbono    | CO <sub>2</sub>                  | 1                           | 1       | 1        | 1        |
| Metano                | CH <sub>4</sub>                  | 21                          | 72      | 25       | 8        |
| Oxido nitroso         | N <sub>2</sub> O                 | 310                         | 289     | 298      | 153      |
| CFC-11                | CCl <sub>3</sub> F               | 3.800                       | 6.730   | 4.750    | 1.620    |
| CFC-12                | CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>  | 8.100                       | 11.000  | 10.900   | 5.200    |
| Tetracloro de carbono | CCl <sub>4</sub>                 | 1.400                       | 2.700   | 1.400    | 435      |
| Metil clorofórmio     | CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> | 100                         | 506     | 146      | 45       |
| Clorofórmio           | CHCl <sub>3</sub>                | 4                           | 108     | 31       | 9,3      |

a Segundo Relatório de Avaliação “Second Assessment Report (SAR)” – IPCC

Fonte: [58,59]

A redução das emissões vai depender do tipo de processo. Se o processo é centralizado, será necessário o uso de transporte para levar os substratos até uma estação de biodigestão

centralizada, a qual pode gerar maiores quantidades de emissões gasosas na atmosfera pela utilização de combustíveis no transporte [49].

A conversão de resíduos animais em biogás reduz a produção do gás metano, além de que uma combustão eficiente oxida termicamente metano a dióxido de carbono. Dado que o metano é cerca de 25 vezes mais eficaz na retenção de calor na atmosfera do que o dióxido de carbono (vide Tabela 2.4), a combustão de biogás gera uma redução líquida das emissões de GEE [58].

## **2.2. Fundamentos biológicos da digestão anaeróbia**

O biogás é produto da conversão de compostos orgânicos por meio de diferentes mecanismos que envolve etapas complexas para a formação do principal hidrocarboneto, metano ( $\text{CH}_4$ ), que com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) são os principais componentes do processo da digestão anaeróbia [41]. Geralmente, os processos de digestão anaeróbia são mais produtores de energia que consumidores, diminuindo os custos de operação, além disso, a digestão anaeróbia apresenta baixa produção de biomassa celular, necessitando somente 10% dos nutrientes que seriam necessários para um processo aeróbio [15]. Alguns autores classificam os processos de digestão anaeróbia em duas etapas ou estágios denominados acidogênese e metanogênese [15,60]; outros autores classificam os processos da digestão anaeróbia em três etapas incluindo a etapa de hidrólise [35,43].

Atualmente, é amplamente utilizada para descrever os processos bioquímicos envolvidos a existência de quatro etapas ou estágios nos quais envolvem diferentes reações bioquímicas com diferentes microrganismos e substratos, sendo estas etapas, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese [36,41,51]. Na Figura 2.2 mostra-se as diferentes etapas do processo da digestão anaeróbia a partir de compostos orgânicos, com os principais microrganismos que participam na produção de biogás.

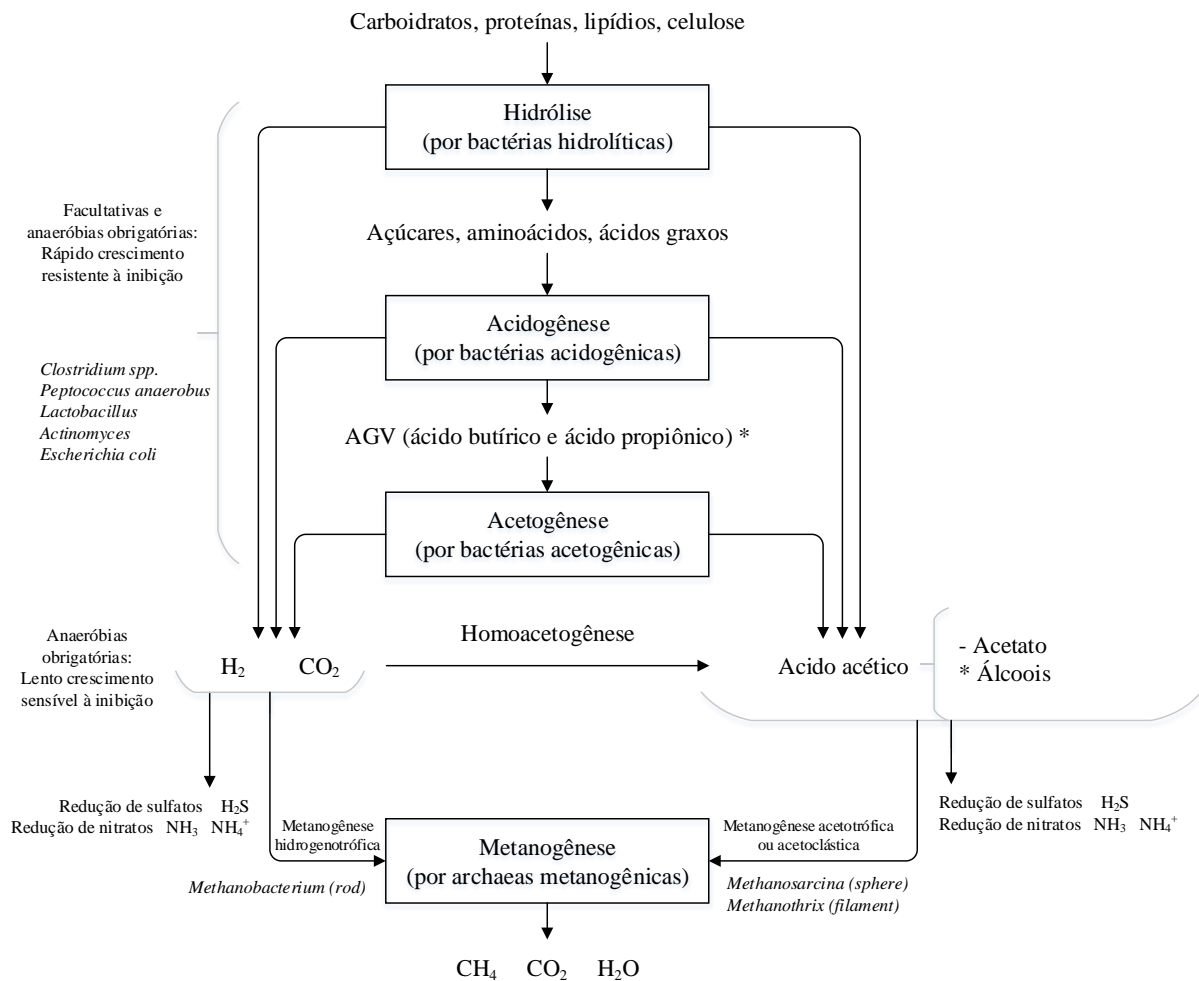


Figura 2.2 – Diagrama esquemático da degradação anaeróbia de compostos orgânicos com grupos microbianos envolvidos para produção de biogás

Fonte: adaptado de [36,43,61]

### 2.2.1. Hidrólise

Esta etapa do processo é muito importante, pois nela as moléculas orgânicas complexas são degradadas até gerar compostos mais simples. Este processo é realizado pelas enzimas extracelulares (exoenzimas) que são liberadas pelas bactérias fermentativas hidrofílicas. Estas bactérias, em geral, são bactérias facultativas (ativas em ambientes com ou sem oxigênio) e bactérias anaeróbias obrigatórias ou estritas (ativas somente em ambientes sem oxigênio), as quais degradam os compostos orgânicos complexos (polímeros orgânicos), tais como carboidratos, proteínas, lipídios e celulose, e transformando-os em moléculas menores

(monômeros), tais como açúcares, ácidos graxos, aminoácidos e peptídeos, bem como uma pequena quantidade de ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono [35,41,51].

Nesta etapa, as ligações covalentes são divididas numa reação química com água (vide Figura 2.3), sendo que a hidrólise dos hidratos de carbono ocorre dentro de poucas horas, a hidrólise de proteínas e lipídeos dentro de poucos dias, e a lignocelulose e lignina são degradados de forma lenta e incompleta [36]. A energia reservada na molécula orgânica complexa original é redistribuída em 5% para hidrogênio, 20% para ácido acético e 75% na molécula orgânica fracionada (monômero) [41].

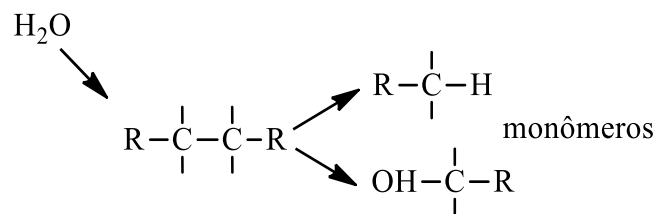
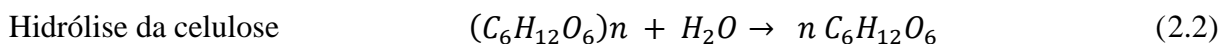


Figura 2.3 – Formação de monômeros

Fonte: [36]

Um exemplo clássico da hidrólise acontece quando a celulose é hidrolisada pela bactéria hidrolítica *Cellulomonas* liberando muitas moléculas de glucose solúveis (Equação 2.2); esta bactéria tem a capacidade de hidrolisar a celulose, porque ela processa a enzima celulase, que é capaz de quebrar as ligações entre os monômeros de glucose.



Todas as bactérias produzem endoenzimas, mas nem todas as bactérias produzem exoenzimas. Uma única bactéria não produz todas as exoenzimas que são necessárias para degradar a grande variedade de partículas coloidais e substratos que são encontrados em lodos e águas residuais (vide Tabela 2.5). Cada exoenzima, bem como cada endoenzima, degrada só um substrato específico ou grupo de substratos. Portanto, é necessário uma grande e diversa comunidade de bactérias para assegurar que os tipos apropriados de exoenzimas e endoenzimas estejam disponíveis para degradação dos substratos presentes.

Tabela 2.5 – Exoenzimas e seus substratos

| Substrato a ser degradado | Exoenzima necessária | Exemplo  | Bactéria      | Produto          |
|---------------------------|----------------------|----------|---------------|------------------|
| Polissacarídeos           | Sacarolítica         | Celulase | Cellulomonas  | Açúcares simples |
| Proteínas                 | Proteolítica         | Protease | Bacillus      | Aminoácidos      |
| Lipídeos                  | Lipolítica           | Lípase   | Mycobacterium | Ácidos graxos    |

Fonte: [43]

### 2.2.2. Acidogênese

Nesta etapa do processo, os monômeros formados na fase hidrolítica, tais como os açúcares, ácidos graxos, aminoácidos e peptídeos, são fermentados pelas diferentes bactérias facultativas e anaeróbias obrigatórias e são degradados para ácidos orgânicos voláteis (AGV) de cadeia curta, com moléculas de 1 até 5 átomos de carbono (ácido butírico, propiônico), além de acetato e álcoois [36,62]. Similar à etapa hidrolítica, a acidogênese também produz pequenas quantidades de ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono [36,41]. Na acidogênese, 10% da energia é liberada na forma de hidrogênio, 35% em ácido acético e o restante é reservado para os ácidos graxos voláteis [41].

As vias de degradação para a acetogênese são as seguintes:

- Carboidratos: Formação de ácido butírico (via ácido butírico), sobretudo pelo *Clostridium*. Ácido acetoacético → 2 - hidroxibutirato → ácido trans-2-butenóico → ácido butírico (vide Figura 2.4)
- Ácidos graxos: Estes são degradados, por exemplo a partir de *Acetobacter* por  $\beta$ -oxidação. Portanto, o ácido graxo está ligado com a Coenzima A e, em seguida, oxida gradualmente, com cada passo dois átomos de carbono são separados, os quais são liberadas como acetato.
- Aminoácidos: Estes são degradados pela reação Stickland pelo *Clostridium botulinum* tendo dois aminoácidos ao mesmo tempo - como um doador de hidrogênio o outro como receptor de elétrons - em acoplamento com acetato, amônia e CO<sub>2</sub>. Durante a divisão da cisteína, libera-se sulfeto de hidrogênio.

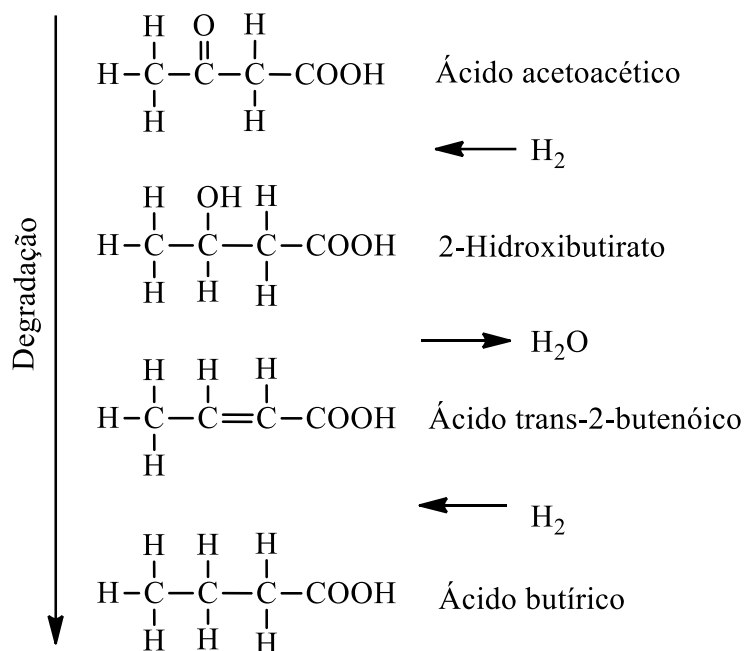


Figura 2.4 – Degradação do ácido acetoacético pela via do ácido butírico

Fonte: [36]

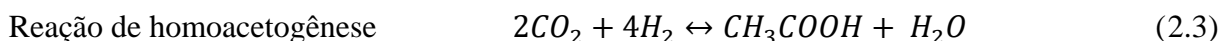
### 2.2.3. Acetogênese

A acetogênese é o processo conhecido pela formação de ácido acético, onde os ácidos graxos voláteis são completamente degradados em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, sendo o acetato o principal ácido orgânico volátil usado como substrato pelo archaeas formadora de metano, enquanto que, o dióxido de carbono e hidrogênio podem ser convertidos diretamente para acetato ou metano [41,43,63].

As reações acetogênicas são endergônicas<sup>10</sup>, nas quais, para a degradação do ácido propiônico, são necessários  $\Delta G_f' = + 76,11$  kJ/mol e com a degradação de etanol  $\Delta G_f' = +9,6$  kJ/mol [36]. Nesta etapa, 17% da energia é transferida para o ácido acético, e 13% para o hidrogênio [41]. Além disso, na etapa acetogênica ocorre a homoacetogênese, onde

<sup>10</sup> Reação endergônica é uma reação química que precisa de energia e onde a variação da energia livre de Gibbs é maior que zero.

microrganismos constantemente fazem a redução exergônica<sup>11</sup> do H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> a ácido acético, por meio de uma reação química (Equação 2.3) [36].



As bactérias acetogênicas são obrigatórias produtoras de hidrogênio (vide Tabela 2.6). A formação de acetato por oxidação de longas cadeias de ácidos graxos (por exemplo, propiônico ou butírico) somente é termodinamicamente possível com a pressão parcial de hidrogênio muito baixa. Bactérias acetogênicas podem obter a energia necessária para a sua sobrevivência e crescimento somente a muito baixas concentrações de hidrogênio [36]. As bactérias acetogênicas tem um crescimento relativamente lento, com tempos de geração usualmente de 3 dias [43].

Tabela 2.6 – Principais reações de degradação acetogênica

| Substrato                     | Reação   |
|-------------------------------|--|
| Ácido propiônico              | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$                                       |
| Ácido butírico                | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$                                   |
| Ácido valérico                | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$ |
| Ácido isovalérico             | $(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2 + \text{H}^+$                  |
| Ácido caprótico               | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{COOH} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 5\text{H}_2$                                    |
| Dióxido de carbono/hidrogênio | $2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O}$  |
| Glicerina                     | $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$   |
| Ácido láctico                 | $\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$                              |
| Etanol                        | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2$  |

Fonte: [36]

Bactérias acetogênicas e archaeas metanogênicas, portanto, devem viver em simbiose. Os organismos metanogênicos podem sobreviver com maior pressão parcial de hidrogênio, sendo que eles constantemente removem os produtos de metabolismo das bactérias acetogênicas de modo a manter a pressão parcial de hidrogênio,  $p_{\text{H}_2}$ , a baixos níveis, adequado para as bactérias acetogênicas [36,43]. Quando a pressão parcial de hidrogênio é baixa, hidrogênio, dióxido de

<sup>11</sup> Reação exergônica é uma reação química que libera energia e onde a variação da energia livre de Gibbs é menor que zero.

carbono e acetato são predominantemente formados pelas bactérias acetogênicas. Quando a pressão parcial de hidrogênio é mais elevada, predominantemente ácidos butírico, capróico, propiônico, valérico e etanol são formados. Desses produtos, as archaeas metanogênicas podem processar apenas hidrogênio, dióxido de carbono e acetato [27,36,43].

Apenas 5 - 6% de toda a formação de metano pode ser atribuído ao oxigênio dissolvido, o qual pode ser explicado pela “transferência interespecífica de hidrogênio” pelo qual o hidrogênio desloca-se diretamente desde os microrganismos acetogênicos aos metanogênicos, sem ser dissolvida no substrato [27,36]. Cerca do 20% da produção de metano do sistema tem como precursor o propionato que durante a acetogênese é convertido a acetato, hidrogênio e dióxido de carbono [51].

#### 2.2.4. Metanogênese

A metanogênese é a etapa final do processo da digestão anaeróbia, e na qual é formado metano ( $\text{CH}_4$ ), principalmente a partir de acetato ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ). O metano é também formado partindo de outros compostos orgânicos diferentes do ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), tais como, ácido fórmico ( $\text{HCOOH}$ ), metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) e metilamina ( $\text{CH}_3\text{NH}_2$ ) [41,43].

Quando a formação de metano funciona sem problemas, a fase acetogênica também funciona sem problemas, mas, quando a formação de metano é perturbada, ocorre a superacidificação. Outros problemas também podem ocorrer quando as bactérias acetogênicas vivem em simbiose com outros organismos diferentes das espécies metanogênicas, as quais também utilizam  $\text{H}_2$  proveniente da acetogênese. Em águas residuárias, a simbiose pode ocorrer com microrganismos que reduzem o sulfato a sulfeto de hidrogênio, o qual pode afetar causar toxicidade na metanogênese [30,36,43].

Anteriormente, acreditava-se que a metanogênese fosse realizada por um grupo de bactérias denominadas *archaebacteria* [64]. Mas na atualidade, e segundo a classificação filogenética atual dos seres vivos, sabe-se que a etapa metanogênica é realizada por um grupo de microrganismos chamados *Archaeas* metanogênicas [21,27,36,61,65,66]. As principais

espécies metanogênicas, *Methanobacterium*, *Methanospirillum hungatii*, e *Methanosarcina*, só podem produzir metano de determinados substratos (vide Tabela 2.7).

Tabela 2.7 – Espécies de Archaeas formadoras de metano e seus substratos

| Espécies                                    | Substrato  |
|---|--|
| <i>Methanobacterium formicium</i>           | Dióxido de carbono, formiato, hidrogênio                     |
| <i>Methanobacterium thermoautotrophicum</i> | Hidrogênio, dióxido de carbono, monóxido de carbono          |
| <i>Methanococcus frisius</i>                | Hidrogênio, metanol, metilamina                              |
| <i>Methanococcus mazei</i>                  | Acetato, metanol, metilamina                                 |
| <i>Methanosarcina bakerii</i>               | Acetato, dióxido de carbono, hidrogênio, metanol, metilamina |

Fonte: [43]

As diferentes archaeas envolvidas na etapa metanogênica, em geral tem intervalos de temperatura nos quais podem gerar metano de maneira mais eficiente (vide Tabela 2.8). Estes intervalos de temperatura produzem uma maior taxa de metano na medida que se incrementa a temperatura, embora exista um intervalo de temperatura, geralmente ente 40 – 50°C, nas quais as archaeas metanogênicas diminuem sua capacidade de geração de metano devido às mudanças do tipo de microrganismo.

Tabela 2.8 – Temperatura ótima de crescimento alguns archaeas formadoras de metano

| Intervalo de temperatura | Gênero   | Temperatura ótima (°C) |
|--------------------------|--|------------------------|
| Mesofílica               | <i>Methanobacterium</i>  | 37 - 45                |
|                          | <i>Methanobrevibacter</i>  | 37 - 40                |
|                          | <i>Methanococcus, Methanosphaera, Methanolobus, Methanoculleus, Methanospirillum, Methanolobus</i> | 35 - 40                |
|                          | <i>Methanosarcina, Methanocorpusculum, Methanoplanus</i>   | 30 - 40                |
|                          | <i>Methanogenium</i>   | 20 - 40                |
|                          | <i>Methanococcooides</i>   | 30 - 35                |
|                          | <i>Methanohalophilus</i>   | 35 - 45                |
| Termofílica              | <i>Methanosarcina, Methanohalobium</i>   | 50 - 55                |

Fonte: [67]

A formação do metano é uma reação exergônica (vide Tabela 2.9), além disso, nem todas as espécies metanogênicas podem degradar todos os substratos, pelo qual é necessário uma

mistura de espécies metanogênicas que possa degradar os diferentes substratos gerados na etapa anterior [36]. Pode-se dividir substratos aceitáveis para metanogênese em três grupos seguintes:

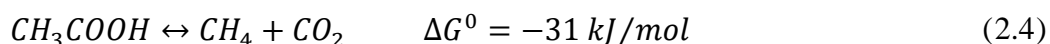
- Tipo CO<sub>2</sub> : CO<sub>2</sub>, HCOO<sup>-</sup>, CO
- Tipo acetato : CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>
- Tipo metilo : CH<sub>3</sub>OH, CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>NH<sub>2</sub><sup>+</sup>, (CH<sub>3</sub>NH<sup>+</sup>)<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>SH, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S

Tabela 2.9 – Principais reações de degradação metanogênicas

| Substrato                   | Reação   | $\Delta G_f'$ (kJ/mol) | Espécies metanogênicas |
|-----------------------------|--|------------------------|------------------------|
| Tipo CO <sub>2</sub>        | $4H_2 + HCO_3^- + H^+ \rightarrow CH_4 + 3H_2O$    | - 135,4                | Todas as espécies      |
| Tipo CO <sub>2</sub>        | $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$             | - 131,0                | Todas as espécies      |
| Tipo CO <sub>2</sub>        | $4HCOO^- + H_2O + H^+ \rightarrow CH_4 + 3HCO_3^-$ | - 130,4                | Muitas espécies        |
| Tipo acetato                | $CH_3COO^- + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^-$      | - 30,9                 | Algumas espécies       |
| Tipo metilo                 | $4CH_3OH \rightarrow 3CH_4 + HCO_3^- + H^+ + H_2O$ | - 314,3                | Uma espécie            |
| Tipo metilo                 | $CH_3OH + H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$             | - 113,0                | Uma espécie            |
| Tipo metilo<br>(ex. Etanol) | $2CH_3CH_2OH + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2CH_3COOH$  | - 116,3                | Uma espécie            |

Fonte: [36]

Existem três grupos principais de archaeas para a formação de metano, os quais são: a metanogênese hidrogenotrófica, metanogênese acetotrófica e metanogênese metilotrófica, embora as duas rotas mais importantes para a formação de metano sejam os dois primeiros grupos [21,36,43]. A oxidação do ácido acético (metanogênese acetotrófica), é, em comparação com a redução do dióxido de carbono e hidrogênio (metanogênese hidrogenotrófica), apenas um pouco exergônica (vide Equação 2.4 e 2.5). No entanto, apenas 27 - 30% do metano provém da redução, enquanto 70% de metano vem da oxidação do acetato a metano [36,43].





#### 2.2.4.1. Metanogênese hidrogenotrófica

Na metanogênese hidrogenotrófica, utiliza-se hidrogênio para converter o dióxido de carbono em metano (vide Equação 2.6). Ao converter dióxido de carbono em metano, esses organismos ajudam a manter uma baixa pressão parcial de hidrogênio no digestor anaeróbio que é necessário para as archaeas acetogênicas.



#### 2.2.4.2. Metanogênese acetotrófica

Na metanogênese acetotrófica, são produzidos o acetato em metano e dióxido de carbono (vide Equação 2.7). O dióxido de carbono produzido a partir de ácido acético pode ser convertido por metanogênese hidrogenotrófica em metano (Equação 2.6). Somente alguns metanógenos hidrogenotróficos utilizam monóxido de carbono para produzir metano (vide Equação 2.8).

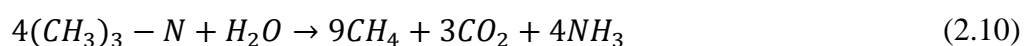



---

<sup>12</sup> NAD: Dinucleótido de nicotinamida e adenina “Nicotinamide Adenine Dinucleotide”, é uma coenzima encontrada em células vivas e composta por um dinucleótido. Apresenta dois estados de oxidação: NAD<sup>+</sup> (oxidado) e NADH (reduzido). A forma NADH é obtida pela redução do NAD<sup>+</sup> com dois elétrons e aceitação de um próton (H<sup>+</sup>). Sua função principal é o intercâmbio de elétrons e hidrogênios na produção de energia de todas as células.

### 2.2.4.3. Metanogênese metilotrófica

Os metanógenos metilotróficos crescem em substratos que contêm, principalmente o grupo metilo (-CH<sub>3</sub>). Exemplos desses substratos incluem metanol e metilamina (vide Equação 2.9 e 2.10). A metanogênese hidrogenotrófica e a metanogênese acetotrófica produzem metano de ácido acético, dióxido de carbono e hidrogênio, enquanto a metanogênese metilotrófica produz metano diretamente de grupos metilo e não de dióxido de carbono.



## 2.3. Regeneração de microrganismos

A maioria de metano gerado a partir de acetato é produzida por duas das archaeas acetotróficas, *Methanosarcina* e *Methanotherix*. Utilizando acetato para a metanogênese *Methanosarcina barkeri*, *Methanobacterium söhngeni* e *Methanobacterium thermoautotrophicum* crescem muito lentamente, com um tempo de regeneração teórico de pelo menos 100 horas (vide Tabela 2.10). Quando é utilizado um substrato rico em energia, como, por exemplo, metanol ou metilamina, o tempo de regeneração é inferior (40 horas com *Methanosarcina* em metanol). No entanto, o tempo de regeneração pode ser substancialmente longo em condições reais [36,43].

As archaeas metanogênicas acetotróficas se reproduzem mais lentamente que as archaeas metanogênicas hidrogenotróficas, além disso, são negativamente afetados pela acumulação de hidrogênio. Por conseguinte, a manutenção de uma baixa pressão parcial de hidrogênio em um digestor anaeróbio é favorável para a atividade não apenas de bactérias formadoras de acetato, mas também das archaeas acetotróficas. Sob uma pressão parcial relativamente elevada de hidrogênio, a produção de acetato e metano são reduzidas [43]. Os microrganismos metanogênicos possuem uma velocidade de crescimento e um fator de produção de biomassa

inferior ao dos grupos acetogênicos e sulfato redutores, o que muitas vezes gera desequilíbrio no processo de degradação do substrato [34].

Tabela 2.10 – Tempo de regeneração de diferentes microrganismos anaeróbios em comparação com microrganismos aeróbios

| Microrganismos anaeróbios           | Tempo de regeneração |
|-------------------------------------|----------------------|
| Bactérias acidogênicas              |                      |
| <i>Bacteróides</i>                  | < 24 horas           |
| <i>Clostridia</i>                   | 24 – 36 horas        |
| Bactérias acetogênicas              | 80 – 90 horas        |
| Archaeas metanogênicas              |                      |
| <i>Methanosarcina barkeri</i>       | 5 – 16 dias          |
| <i>Methanococcus</i>                | Cerca de 10 dias     |
| Microrganismo aeróbio               |                      |
| <i>Escherichia coli</i>             | 20 minutos           |
| <i>Bactérias de lodos ativados</i>  | 2 horas              |
| <i>Bactérias que vivem na terra</i> | 1 – 5 horas          |

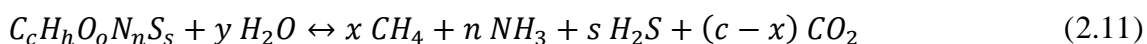
Fonte: [36]

Para evitar a lavagem das *archaeas* para fora do reator, o tempo de retenção hidráulica (TRH) deve ser pelo menos 10-15 dias com sistemas de reatores que não têm instalações para retenção e retorno de biomassa. Em comparação, os tempos de regeneração de bactérias hidrolíticas e acidogênicas são significativamente mais curtos, não tendo risco de lavagem delas. A baixa taxa de crescimento dos organismos metanogênicos significa que para as unidades de biogás o tempo de partida é relativamente longo, sendo necessário tempos de até 3 meses, porque a quantidade de inoculação necessária para iniciar a usina em plena capacidade ainda não está disponível na fase inicial [36].

## 2.4. Estequiometria da reação anaeróbia

O balance estequiométrico dos compostos orgânicos para formar os produtos depois de uma reação anaeróbia pode ser obtido através do balanço de massa. Compostos orgânicos de moléculas longas são usualmente formados de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O),

nitrogênio (N) e enxofre (S). Estes compostos são convertidos com água a metano, dióxido de carbono, amônia e sulfeto de hidrogênio. A forma geral da reação bioquímica pode expressar-se com as Equações (2.11, 2.12 e 2.13) [36,41].



$$x = 1/8 (4c + h - 2o - 3n - 2s) \quad (2.12)$$

$$y = 1/4 (4c - h - 2o + 3n + 2s) \quad (2.13)$$

Os produtos incluem, por exemplo:

- Carboidratos :  $C_6H_{12} \rightarrow 3 CO_2 + 3 CH_4$
- Gorduras :  $C_{12}H_{24}O_6 + 3 H_2O \rightarrow 4,5 CO_2 + 7,5 CH_4$
- Proteínas :  $C_{13}H_{25}O_7N_3S + 6 H_2O \rightarrow 6,5 CO_2 + 6,5 CH_4 + 3 NH_3 + H_2S$

Como o enxofre permanece no resíduo e parte do  $CO_2$  é combinado com  $NH_3$ , o resultado geral é uma composição de biogás de  $CH_4:CO_2=71\%:29\%$ , sendo que a proporção de  $CO_2$  em  $CH_4$  é determinada pela taxa de redução da matéria-prima orgânica [36].

## 2.5. Parâmetros que influenciam na digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia depende de vários parâmetros para se ter um desempenho ideal. Diferentes grupos de microrganismos estão envolvidos na produção de metano, e condições adequadas têm que ser estabelecidas para manter todos os microrganismos em equilíbrio. Condições ambientais no biodigestor (vide Tabela 2.11) tais como pH, temperatura, mistura, substratos, relação C/N e o tempo de retenção hidráulica (TRH) podem determinar o rendimento de biogás [68,69]. A digestão é um processo lento, a metanização usualmente ocorre depois de duas a três semanas [36]. Para um melhor desempenho dos organismos metanogênicos o intervalo de pH deve estar entre 6,7-7,5; enquanto a temperatura vai depender do tipo de microrganismos envolvidos no processo, sendo que para as archaeas metanogênicas, uma

temperatura mais elevada é favorável para o desenvolvimento e produção de biogás. O tempo na qual as archaeas metanogênicas produzem biogás vai depender da temperatura na qual está operando o biodigestor, sendo que pelo menos precisam de um tempo de 10-15 dias [70]. A mistura de carbono e de nitrogênio é um parâmetro importante, que também vai favorecer ao processo de biodigestão, e, em geral deve permanecer nos intervalos de 16:1 - 25:1. A concentração de sólidos no digestor deve estar entre 7% e 9%. Luz não é letal para as archaeas metanogênicas, mas inibe severamente a metanização, pelo que, a formação de metano deve, portanto, ter lugar na escuridão absoluta [71].

Tabela 2.11 – Requerimentos ambientais da digestão anaeróbia

| Parâmetros                       | Hidrólise/acidogênese                  | Formação de metano        |
|----------------------------------|--|---------------------------|
| Temperatura (° C)                | 25 - 35                                | Mesofílico: 32 - 42       |
|                                  | -                                      | Termofílico 50 - 58       |
| Valor de pH                      | 5,2 - 6,3                              | 6,7 - 7,5                 |
| Relação C:N                      | 10 - 45                                | 20 - 30                   |
| Conteúdo de ST (%)               | < 40                                   | < 30                      |
| Potencial Redox (mV)             | + 400 até - 300                        | < - 250                   |
| Requerimento de relação C:N:P:S  | 500:15:5:3                             | 600:15:5:3                |
| Oligoelementos (elementos traço) | Não precisa<br>requerimentos especiais | Essencial: Ni, Co, Mo, Se |

Fonte: [71]

O tamanho das partículas também pode ser um parâmetro importante, sendo que o tamanho das partículas utilizadas pode afetar a degradação e, finalmente, a taxa de produção de biogás [36,69,72]. Pesquisas sobre o tamanho de partículas das silagens para produção de biogás, feitas por Prochnow (2009, apud Kalač, 2011) [73], descrevem que os dados da literatura sobre o rendimento de biogás são ambíguos e que os tamanhos de partículas dos silagens, usadas para alimentação do gado são aceitáveis, sendo só necessário uma trituração adicional caso o rendimento de metano exceda a demanda de energia adicional.

### 2.5.1. pH e alcalinidade

No processo de digestão anaeróbia a alcalinidade serve como um tampão para evitar que ocorram mudanças rápidas no pH, pois é necessário que os valores de pH se encontrem perto do valor neutro. A alcalinidade pode ser o resultado da libertação de grupos amino (-NH<sub>2</sub>) e produção de amônia (NH<sub>3</sub>) como resíduos proteicos degradados. No entanto, a alcalinidade está presente principalmente na forma de bicarbonatos que estão em equilíbrio com o dióxido de carbono no biogás a um determinado pH, podendo estes favorecer a capacidade tampão do meio [43]. Quando os compostos orgânicos são degradados, o dióxido de carbono é liberado. Quando aminoácidos e proteínas são degradadas, dióxido de carbono e amônia são liberados. A libertação de dióxido de carbono resulta na produção de ácido carbônico, alcalinidade de bicarbonato, e alcalinidade de carbonato (vide Equação 2.14). A libertação de amônia resulta na produção de íons de amônio (vide Equação 2.15).



Para o ótimo desenvolvimento das bactérias e archaeas envolvidas na digestão as condições ambientais têm que ser diferentes para os estágios da formação do metano (vide Tabela 2.11). A atividade enzimática aceitável das bactérias formadoras de ácido na hidrólise e acidogênese ocorre acima de pH 5,0, enquanto para a atividade enzimática aceitável das archaeas metanogênicas são necessários intervalos de pH entre 6,1-7,8 (vide

Tabela 2.12). Apenas a *Methanosarcina* é capaz de resistir a valores mais baixos de pH (pH = 6,5 e menos). Com as outras bactérias, o metabolismo é consideravelmente suprimido a pH <6,7. Se os valores de pH diminuem abaixo de pH = 6,5 as bactérias começam a gerar ácidos orgânicos que conduzem a uma diminuição adicional do valor de pH e, possivelmente, a finalização da fermentação [71]. Portanto, processos de fermentação realizados em apenas um biodigestor devem respeitar esses intervalos de pH [28].

Tabela 2.12 – pH ótimo de crescimento de alguns archaeas formadoras de metano

| Gênero                  | pH        |
|-------------------------|-----------|
| <i>Methanosphaera</i>   | 6,8       |
| <i>Methanothermus</i>   | 6,5       |
| <i>Methanogenium</i>    | 7,0       |
| <i>Methanolacinia</i>   | 6,6 - 7,2 |
| <i>Methanomicrobium</i> | 6,1 - 6,9 |
| <i>Methanospirillum</i> | 7,0 - 7,5 |
| <i>Methanococcoides</i> | 7,0 - 7,5 |
| <i>Methanohalobium</i>  | 6,5 - 7,5 |
| <i>Methanlobus</i>      | 6,5 - 6,8 |
| <i>Methanothrix</i>     | 7,1 - 7,8 |

Fonte: [43]

### 2.5.2. Sólidos totais

Os sólidos totais (ST), também conhecidos como matéria seca (MS), podem dar uma ideia da característica do resíduo quanto à viscosidade e, portanto a comportamento ao escoamento e ao bombeamento, sendo usualmente expresso em porcentagem em relação ao peso úmido da amostra. O valor dos sólidos totais depende geralmente do tipo de substrato tendo intervalos variáveis que podem depender de fatores como variedade das culturas energéticas, raça e alimentação dos animais, entre outros, sendo que para o esterco de gado o valor pode se encontrar nos intervalos 13 - 33% [74]. Os sólidos totais resultam da evaporação da água a 103 -105°C até a obtenção do peso constante da amostra [15].

### 2.5.3. Sólidos voláteis

O valor de sólidos voláteis (SV), também conhecidos como matéria orgânica seca (MOS), corresponde, aproximadamente à quantidade de matéria orgânica digerível contida no resíduo. Os sólidos voláteis resultam da diferença de sólidos totais e sólidos fixos, sendo expressos geralmente, em porcentagens de sólidos totais [15,47]. Os sólidos fixos (SF), são os componentes inorgânicos, principalmente os elementos fertilizantes como, N, P, K, Ca, Cu, Zn, Fe, etc., e representam por volta de 20% da parte sólida dos resíduos dos animais. O valor dos

sólidos fixos é determinado pelo peso das cinzas resultantes da combustão dos sólidos totais a 550 °C [15,27]. Embora existam algumas margens de erro no momento de fazer a análise dos sólidos voláteis, principalmente nos substratos acidificados, como as silagens, existe a possibilidade de fazer a correção por meio do uso de um fator desenvolvido por Weissbach [75]. Na Figura 2.5 pode-se observar as parcelas aproximadas de sólidos voláteis e sólidos totais de um substrato, sendo que, a produção de biogás vai ocorrer a partir da degradação da parcela de sólidos voláteis.

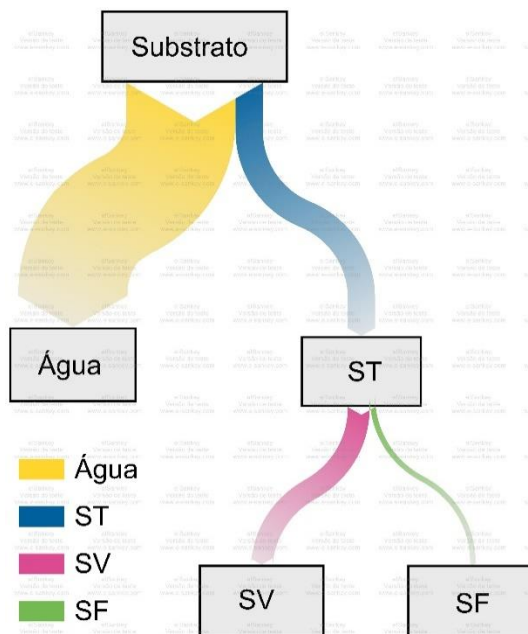


Figura 2.5 – Parcela aproximada de ST, SV e SF dos substratos.

Fonte: elaboração própria baseado em informações de [15,27,47,74]

#### 2.5.4. Relação Carbono/Nitrogênio

As células dos microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia, contém 10 macroelementos, tais carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, fosforo, enxofre, potássio, cálcio, magnésio e ferro, e minerais como o manganês, molibdênio, zinco, cobre, cobalto, níquel, vanádio, boro, cloro, sódio, selênio, silício, e tungstênio [48]. Os microrganismos envolvidos no processo de digestão anaeróbia precisam de macronutrientes e micronutrientes para seu desenvolvimento ótimo [71], sendo que a razão ótima resulta da composição elementar

da biologia celular de macronutrientes de carbono, nitrogênio, fósforo, enxofre (C:N:P:S) é considerada 600:15:5:1 [48]. Um insuficiente fornecimento de nutrientes e oligoelementos podem causar inibição e perturbações na digestão anaeróbia.

O Carbono e nitrogênio, além do fósforo, são as principais fontes de nutrientes dos microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia [27]. Os microrganismos consomem aproximadamente 30 vezes mais carbono do que nitrogênio, portanto o intervalo ótimo destes elementos estão nos valores de 20:1 - 30:1 [76]. No entanto, esta é apenas uma indicação, porque o nitrogênio também pode estar ligado em estruturas de lignina [71]. Além disso, a relação ótima de carbono: nitrogênio também depende da temperatura do processo, sendo que processos com temperaturas termofílicas suportam relações de C:N mais elevadas [77].

O balanço inicial de carbono e nitrogênio é um dos fatores a se ter em conta no momento de fazer o dimensionamento para o funcionamento inicial de um biodigestor que pode influenciar na geração de biogás [72]. Substratos com uma baixa relação C:N podem levar ao incremento da produção de amônia, a qual em grandes quantidades é tóxica e inibe a produção de metano. Enquanto uma elevada relação de C:N significa a insuficiência de nitrogênio e pode ter consequências negativas para a formação de proteínas e, portanto, o metabolismo energético e material para formação de estruturas dos microrganismos, o que pode levar à decomposição mais lenta dos substratos e a período de produção de biogás mais longo, devido à baixa multiplicação e crescimento dos microrganismos [71,76].

Quando se tem um resíduo com uma relação inicial de C:N inadequada, são necessárias misturas de outros substratos para obter uma relação ótima de carbono e nitrogênio [76]. É possível a utilização direta de nutrientes, por exemplo em dejetos de suínos com relações de C:N nos intervalos de 6-8, para melhorar os rendimentos de metano [17]. A composição equilibrada é essencial, por exemplo, a mistura de palha de arroz e resíduos de latrina, que é uma prática comum na China, e na co-digestão de estrume de elefante com dejetos humanos, tal como aplicado no Nepal [71]. Estudos realizados demonstram que a combinação de diferentes resíduos orgânicos para co-digestão anaeróbia resulta em um substrato mais balanceado, equilibrado e degradável, levando para um aumento significativo da produção de biogás [78].

### **2.5.5. Temperatura**

A temperatura do processo de biodigestão, embora muitas vezes seja um parâmetro não controlado ou deixado só à consideração da temperatura ambiental, é um dos fatores importantes dentro da digestão anaeróbia. A digestão anaeróbia é um processo eminentemente biológico, uma vez que os organismos que participam das diferentes etapas devem se adaptar ao meio [15]. Uma temperatura aceitável e uniforme deve ser mantida durante todo o processo da biodigestão e impedir que pontos localizados de temperaturas diferentes possam deprimir a atividade dos microrganismos, sendo que as variações na temperatura de até alguns graus pode afetar quase toda a atividade biológica, incluindo a inibição de algumas archaeas ou bactérias anaeróbias, especialmente archaeas formadoras de metano [36,43]. As taxas de crescimento e reação se incrementam conforme se aumenta a temperatura, enquanto em temperaturas menores do que 10-15°C se inibe a atividade microbiana, interrompendo o processo [15].

A maioria das archaeas metanogênicas são mesofílicas e só algumas são termofílicas, no entanto, algumas podem produzir metano a temperaturas baixas (0,6°C - 1,2°C), por exemplo, na superfície de camadas de terra congelada. Em testes de laboratório, a formação de metano pode ser comprovada também com temperaturas abaixo de zero [36].

Existem diferentes intervalos de temperatura nas quais estão envolvidos diferentes tipos de microrganismos, sendo que não existe um consenso sobre onde começam e terminam estes intervalos de temperatura. No entanto, a digestão anaeróbia pode classificar-se em três categorias de temperatura: psicofílica (temperatura baixa), mesofílica (temperatura média), e termofílica (temperatura alta) [28,41,43,71,79].

#### **2.5.5.1. Temperatura psicofílica**

Os processos de digestão anaeróbia a temperatura psicofílica normalmente ocorrem nos intervalos de temperatura de 10°C - 25°C e, em geral, se aproveitam condições de climas tropicais e subtropicais em condições de temperatura ambiente (sem aquecimento) [41]. Embora, em algumas ocasiões, alguns biodigestores, em geral de uso doméstico, sejam operados em condições mais adversas e onde as temperaturas possam ser menos favoráveis,

como é o caso dos biodigestores construídos nos Andes acima de 2.000 metros sobre nível do mar [31,80,81].

#### **2.5.5.2. Temperatura mesofílica:**

Estes processos ocorrem em geral nos intervalos de temperatura de 25°C - 40°C [47]. Existe um intervalo de temperaturas particularmente crítico para os microrganismos mesófilos, na gama de 40 - 45°C, pois nesse intervalo eles perdem a sua atividade de forma irreversível [36]. Segundo Gerardi [43], as archaeas metanogênicas são inibidas nos intervalos de temperaturas entre 40°C a 50°C e, em algum ponto perto de 42°C, o desempenho do biodigestor sofre um choque, pois isso representa a transição de microrganismos mesofílicos para termofílicos, além disso, a digestão mesofílica poder ver-se afetada por variações de temperatura de 2 - 3°C em um mesmo dia. As principais archaeas metanogênicas como a *Methanococcus* e *Methanosarcina*, operam em condições ótimas nos intervalos de temperatura entre 35 - 40°C [43]. Os processos de digestão anaeróbia mesofílicos são em geral mais populares, pois são fáceis de começar sua operação, têm um rendimento estável e sua atividade microbiana é relativamente alta [41].

#### **2.5.5.3. Temperatura termofílica**

Os processos de digestão anaeróbia termofílicos ocorrem a elevadas temperaturas, em geral entre os intervalos de 50 – 65°C [41]. A digestão anaeróbia termofílica é geralmente aplicada para tratamento de resíduos animais, industriais e municipais em países da Europa, como Dinamarca e Holanda. A vantagem destes processos, além do tamanho compacto das usinas pelo reduzido TRH, é que estes não precisam de procedimentos especiais de higienização para inativar gérmens epidêmicos e fitopatogênicos, devido a sua elevada temperatura (vide Tabela 2.13). No entanto, existem características associados com a digestão anaeróbia termofílica que podem afetar negativamente o desempenho do processo. Estas características incluem 1) pouco incremento dos microrganismos (aumento no tamanho da população), 2) altas taxas de mortalidade, e 3) a falta de diversidade dos microrganismos. Além disso, as pequenas

flutuações de temperatura, menores que 1°C (vide Tabela 2.14) podem afetar significativamente a digestão anaeróbia [43].

Tabela 2.13 – Comparação entre digestores mesofílicos e termofílicos

| Características                     | Digestor mesofílico | Digestor termofílico |
|-------------------------------------|---------------------|----------------------|
| Taxa de carga                       | Baixo               | Alto                 |
| Destruição de patógenos             | Baixo               | Alto                 |
| Sensibilidade a substâncias tóxicas | Baixo               | Alto                 |
| Custos operacionais                 | Baixo               | Alto                 |
| Controle de temperatura             | Menos difícil       | Mais difícil         |

Fonte: [43]

Tabela 2.14 – Características das temperaturas dos processos de digestão anaeróbia

| Processo anaeróbio | Temperatura (°C) | TRH     | Crescimento microbiano e taxa de digestão | Tolerância à toxicidade | Variação máxima de temperatura por dia (°C) |
|--------------------|------------------|---------|---|-------------------------|---|
| Psicrofílico       | 10 - 25          | >50     | Baixo                                     | Alto                    | -   |
| Mesofílico         | 25 - 40          | 25 - 30 | Médio                                     | Médio                   | 2 - 3                                       |
| Termofílico        | 50 - 65          | 10 - 15 | Alto                                      | Baixo                   | <1  |
| Hipertermofílico   | >65              | -       | -   | -                       | -   |

Fonte: Adaptado de [41,43,47].

### 2.5.6. Tempo de retenção hidráulica

O tempo de retenção hidráulica (TRH) é também um dos parâmetros importantes dentro da digestão anaeróbia e tem muita relação com a temperatura na qual é realizada a digestão anaeróbia (vide Figura 2.6). O tempo de retenção hidráulico vai determinar diretamente o tamanho do biodigestor, já que ele é a razão entre o volume do reator e o fluxo do tratamento, ou seja, o TRH é o tempo médio de residência de um substrato para que este permaneça no biodigestor, submetido à ação de microrganismos, até a saída do mesmo [27,47,82]. Conhecendo o TRH, o ingresso diário de substrato e a taxa de decomposição do substrato, é possível calcular o volume do digestor necessário [48].

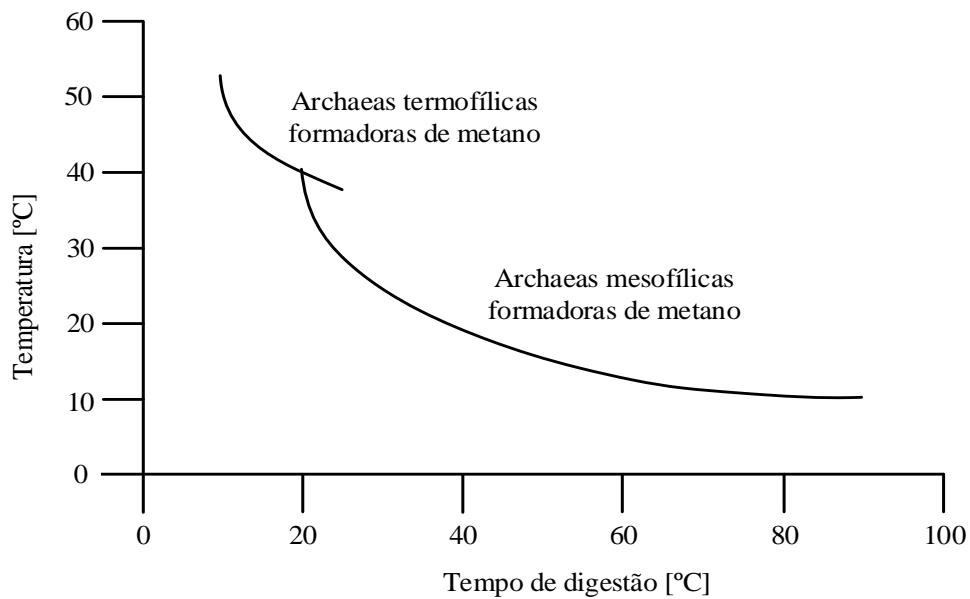


Figura 2.6 – Influencia da temperatura sobre o tempo de digestão

Fonte: [43]

O processo de digestão anaeróbia tem que ser mantido em um tempo de retenção hidráulica ótimo para que exista renovação contínua dos microrganismos contidos no reator, tendo cuidado em evitar que exista lavagens destes microrganismos. Algumas archaeas metanogênicas apresentam tempos de renovação da população microbiana de 10 - 15 dias ou mais [27,71], enquanto tempos de retenção hidráulica menores que 10 dias poderia significar a lavagem das archaeas formadoras de metano [43]. Além disso, se o TRH é curto os microrganismos terão pouco tempo para decompor os substratos, resultando em uma diminuição da produção de biogás. De maneira geral a maioria das usinas de digestão úmida funcionam com tempos de retenção hidráulica de 20 - 40 dias [83].

### 2.5.7. Agitação

Os processos de mistura dos substratos no biodigestor podem ser, mecânicos, por equipamentos no biodigestor, tais como agitadores (vide Figura 2.7); hidráulico, por bombas posicionadas externamente; ou pneumático, pelo soprimento de biogás no biodigestor. No entanto, hoje em dia, em usinas de biogás no países de referência, como Alemanha, cerca de 85% a 90% das usinas fazem uso de dispositivos mecânicos e equipamentos de agitação [27].



Figura 2.7 – Agitadores para biodigestores: (a) agitador axial submergível com altura ajustável (esquerda), (b) agitador de pá

Fonte: [27,84]

Os processos de digestão anaeróbia geralmente ocorrem em reatores anaeróbios que são agitados, sendo a agitação um fator importante para assegurar o ótimo contato entre os substratos envolvidos e as bactérias, distribuindo melhor o calor na biomassa e dando maior uniformidade aos produtos intermediários e finais [15]. Os biodigestores baseados em tecnologias contínuas de mistura completa “Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)”, são muito comuns no âmbito da digestão anaeróbia agrícola, onde o conteúdo é misturado continuamente para manter os sólidos em suspensão e formar uma mistura homogênea [85,86]. Em quase todas as estações de biogás agrícolas baseadas no CSTR o movimento do substrato é induzido por agitação e onde são utilizados diferentes tipos de agitadores ou misturadores [87].

Um nível adequado de produção de biogás só será possível por meio do contato intenso entre os substratos e as bactérias [27]. Além disso, uma mistura adequada do conteúdo do digestor impede o desenvolvimento de bolsas localizadas de variação da temperatura [43]. A agitação é também necessária para evitar a formação de crostas sobre a superfície do biodigestor para garantir distribuição adequada de nutrientes e oligoelementos para os microrganismos [87,88].

A agitação só é recomendável para biodigestores acima de 100 m<sup>3</sup> de volume devido, ao alto custo que isto demanda [15]. O consumo energético do biodigestor pode variar dependendo

da tecnologia, tipo de agitação e horas de funcionamento por dia; no entanto, estes valores oscilam nos intervalos de 2-3% de toda a energia produzida pela usina de biogás [71], podendo ter usinas com potências de 5 kW para biodigestores de 3.000 m<sup>3</sup> de capacidade [27]. No entanto uma mistura excessiva pode incrementar o consumo de energia, deteriorar o balanço energético, e perturbar os microrganismos, diminuindo a produção de biogás [71].

Algumas usinas de biogás operam em baixas velocidades de agitação nos intervalos de 25-150 rpm [86], enquanto que, algumas preferem fazer a agitação em intervalos de 15 min de 2 a 3 vezes por dia, sendo que os intervalos e tempos de agitação necessários têm que ser determinados individualmente para cada instalação de biogás [71].

### **2.5.8. Toxicidade/Inibidores**

São muitos os compostos orgânicos e inorgânicos que podem causar a toxicidade e consequentemente a inibição. Um composto químico pode ser considerado como inibidor quando interrompe o crescimento bacteriano ou faz uma mudança adversa da população bacteriana, sendo que uma indicação de inibição para a digestão anaeróbia é geralmente a parada ou diminuição completa na produção de metano [41]. Os compostos químicos que podem inibir a digestão anaeróbia incluem amônia, sulfito, sulfato, metais pesados e alguns compostos orgânicos [41,43]. Além disso, as temperaturas elevadas acima de 180 °C conduzem à produção de produtos orgânicos solúveis recalcitrantes ou intermediários tóxicos e/ou inibidores, reduzindo, portanto, a biodegradabilidade [89]. Na digestão anaeróbia deve diferenciar-se os inibidores que atingem o biodigestor pela adição de substrato daqueles originados como compostos intermediários em estágios da decomposição [27].

Alguns processos anaeróbios parecem ser relativamente insensíveis aos inibidores e principalmente adaptáveis, mesmo a concentrações que são tóxicos em outras circunstâncias [43,71]. A toxicidade em um digestor anaeróbio pode ser aguda ou crônica; a toxicidade aguda pode ser devido à rápida exposição de uma população de archaeas não aclimatadas a uma concentração relativamente elevada de um resíduo tóxico; e, crônicas pode ser devido à exposição gradual e durante um tempo longo de uma população de archaeas não aclimatadas a um determinado resíduo tóxico. No entanto, as archaeas podem se aclimatar à toxicidade

crônica por dois meios, o primeiro é reparando os sistemas enzimáticos danificados, a fim de ajustar-se aos resíduos tóxicos ou degradar o composto orgânico tóxico; e o segundo é, crescer a população de tal maneira que serão capazes de desenvolver os sistemas de enzimas necessárias para degradar os compostos orgânicos tóxicos[43]. Tempos de retenção hidráulicos longos também permitem que os microrganismos aumentem em número e se aclimatem aos resíduos tóxicos [43].

### 2.5.9. Tipo de substrato

O tipo de substrato pode determinar o processo da degradação anaeróbica (vide Figura 2.8), sendo para isso necessário tomar em consideração o tipo de tecnologia. Existem vários substratos que podem ser utilizados para a digestão anaeróbica. É possível obter biogás de quase de todos os compostos orgânicos, no entanto, alguns destes podem ver-se limitados pelo grau de decomposição em condições reais de produção. Os substratos são mais difíceis de ser degradados de acordo com a seguinte linha: açúcares - proteínas - gorduras – hemicelulosas - celulosas – lignina, estes dois últimos são degradados de maneira lenta e incompleta [71].

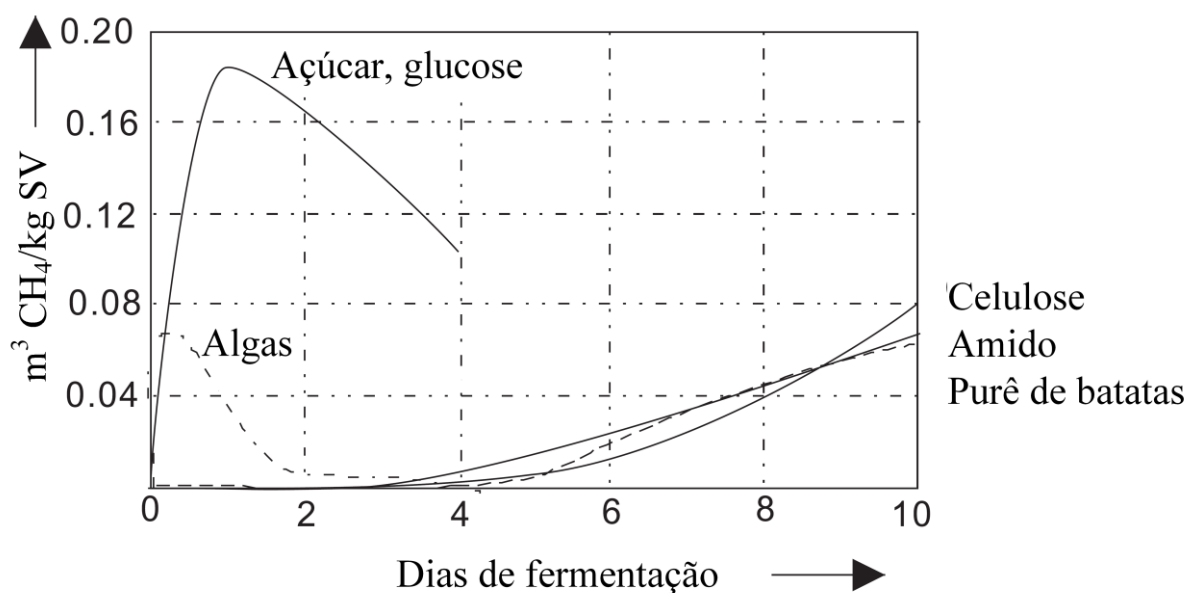


Figura 2.8 – Produção de biogás a partir de diferentes substratos

Fonte: [71]

Se um substrato de vital importância se esgota, os microrganismos param o seu metabolismo. Por conseguinte, é muitas vezes necessário alimentar com substâncias (hidratos de carbono, gorduras, proteínas, substâncias minerais, e oligoelementos) em adição ao substrato. Açúcar, por exemplo, hidrolisa e acidifica dentro de um tempo muito curto.

### **2.5.10. Taxa de carga orgânica (Organic Loading Rate “OLR”)**

Assumindo que a composição do substrato seja constante, quanto maior for a carga orgânica, maior é a quantidade de substrato introduzido no biodigestor, o que reduz o tempo de retenção. Os parâmetros operacionais de uma usina de biogás permitem descrever o seu nível de carga, por exemplo, para comparar diferentes usinas [28]. A Taxa de carga orgânica (Organic Loading Rate “OLR”), mede a quantidade de substrato adicionada ao digestor expressada como kg SV por metro cúbico de biodigestor por dia [ $kg\ SV/m^3_{biogás} \cdot dia$ ].

## **2.6. Considerações finais do capítulo**

O processo bioquímico envolvido na digestão anaeróbia permite conhecer a complexidade do assunto, existindo diferentes tipos de comunidades de microrganismos que trabalham a diferentes condições de pH e temperatura, sendo por sua vez afetados também por processos de mistura. Ainda sendo mencionados somente alguns parâmetros da digestão anaeróbia, é muito difícil controlar todos eles em sistemas de digestão anaeróbia, requerendo sistemas de controle avançados para regular constantemente as condições do sistema.

Dentre os fatores mencionados no capítulo, a temperatura, além do pH, são fatores críticos na digestão anaeróbia, já que as variações de temperatura ambiente durante o dia podem ser superiores, dependendo do lugar, a  $\pm 2^\circ C$ , produzindo mudanças permanentes nas comunidades existentes de microrganismos, principalmente os metanogênicos, e, por consequência a diminuição da produção de biogás; sendo por tanto necessário um sistema de aquecimento no biodigestor que permita manter a temperatura constante ao interior e consequentemente garanta uma produção de biogás constante.

## Capítulo 3.

# **ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE MATERIAL AGRÍCOLA**

### **3.1. Critérios para a seleção da tecnologia**

Na Tabela 3.1 são apresentadas as classificações dos processos para produção de biogás conforme diferentes critérios. A escolha da tecnologia pode depender do tipo de substrato a utilizar, sendo que alguns deles precisam de processos de higienização. Desta forma, em certos casos poderia ser melhor utilizar processos termofílicos; alguns deles apresentam-se com conteúdo elevado de sólidos totais como no caso dos resíduos sólidos, logo uma boa opção seria utilizar processos de digestão seca; ou no caso de garantir a vazão de biogás constante a uma percentagem de metano, a melhor opção seria o processo contínuo ou semicontínuo.

Tabela 3.1 – Classificação dos processos para produção de biogás conforme diferentes critérios

| Critério                            | Tipo           | Intervalo    |
|-------------------------------------|----------------|--------------|
| Teor de matéria seca dos substratos | Digestão úmida | ST: 8 - 12%  |
|                                     | Digestão seca  | ST: 40 – 60% |
| Tipo de alimentação                 | Descontínua    | -            |
|                                     | Semicontínua   | -            |
|                                     | Contínua       | -            |
| Temperatura do processo             | Psicrofílico   | 10 - 25      |
|                                     | Mesofílico     | 25 - 40      |
|                                     | Termofílico    | 50 - 65      |
| Nº de fases do processo             | Uma fase       | -            |
|                                     | Duas fases     | -            |

Fonte: Adaptado de [27,41,43,47,76].

### 3.1.1. Teor de matéria seca dos substratos

A consistência dos substratos depende do teor de matéria seca ou da quantidade de sólidos totais que este tem (vide secção 2.5.2), a qual pode determinar a classificação da tecnologia de biogás em digestão seca e digestão úmida. Geralmente, a digestão úmida se realiza com substratos bombeáveis, os quais podem estar nos intervalos de sólidos totais de 8 a 12 %, e em alguns casos poder ter até 15%, com isto se pode assegurar o bom funcionamento do processo da biodigestão, diminuindo os requerimentos de água. Na digestão seca o intervalo de sólidos totais pode variar entre 40 a 60% [76]. No entanto, não existe um limite que possa condicionar a digestão úmida e a digestão seca [27].

Nos países onde se realizam a digestão úmida e a digestão seca existem restrições legais que limitam o processo a uma das opções, estas restrições muitas vezes vão no sentido de higienização de substratos, como no caso de rejeitos provenientes de abatedouros, os quais devem seguir um processo especial antes de ingressar ao biodigestor, sendo o mais razoável para este tipo de resíduos fazer digestão úmida. Enquanto para resíduos provenientes de mercados, restos de comida, resíduos domésticos, muitas vezes é aconselhável a digestão seca (vide Figura 3.1). No entanto, a digestão úmida é muito mais comum do que a digestão seca [27,71].



Figura 3.1 – Reator do processo DRANCO® com vista na saída cônica (digestão seca)

Fonte: [90]

### 3.1.2. Tipo de alimentação

O tipo de alimentação de uma usina de biogás pode determinar em grande parte a disponibilidade do substrato fresco para os microrganismos. Geralmente, a alimentação pode determinar o processo o qual seguir. A alimentação contínua é o tipo de alimentação na qual o substrato é fornecido de maneira regular várias vezes ao dia, enquanto na alimentação semicontínua o substrato é fornecido no mínimo uma vez por dia [27]. O biodigestor de alimentação contínua ou semicontínua pode ser de vários tipos, dentre os quais, os mais comuns são o reator anaeróbico de fluxo ascendente (UASB), o reator de fluxo pistonado (PFR) e o reator de mistura completa (CSTR) e o reator em batelada (Batch).

#### 3.1.2.1. Reatores de fluxo pistonado (PFR)

Os reatores de fluxo pistonado, ou *Plug Flow Reactor* por seu nome em inglês, podem ser de dois tipos, horizontal ou vertical (vide Figura 3.2a e Figura 3.2b). O reator em posição vertical é comumente empregado em digestões úmidas, sendo raramente usados para a digestão seca [90]. Este tipo de reator funciona aproveitando o efeito do bombeamento do substrato para obter um fluxo em forma de pistão ao longo da direção do fluxo. O tipo de reator mais instalado

é o tipo horizontal, sendo que existem alguns modelos que funcionam de maneira vertical, como no caso do processo de Compostagem Anaeróbica Seca (da sua denominação em inglês Dry Anaerobic Composting – DRANCO) com fluxo pistonado [71].

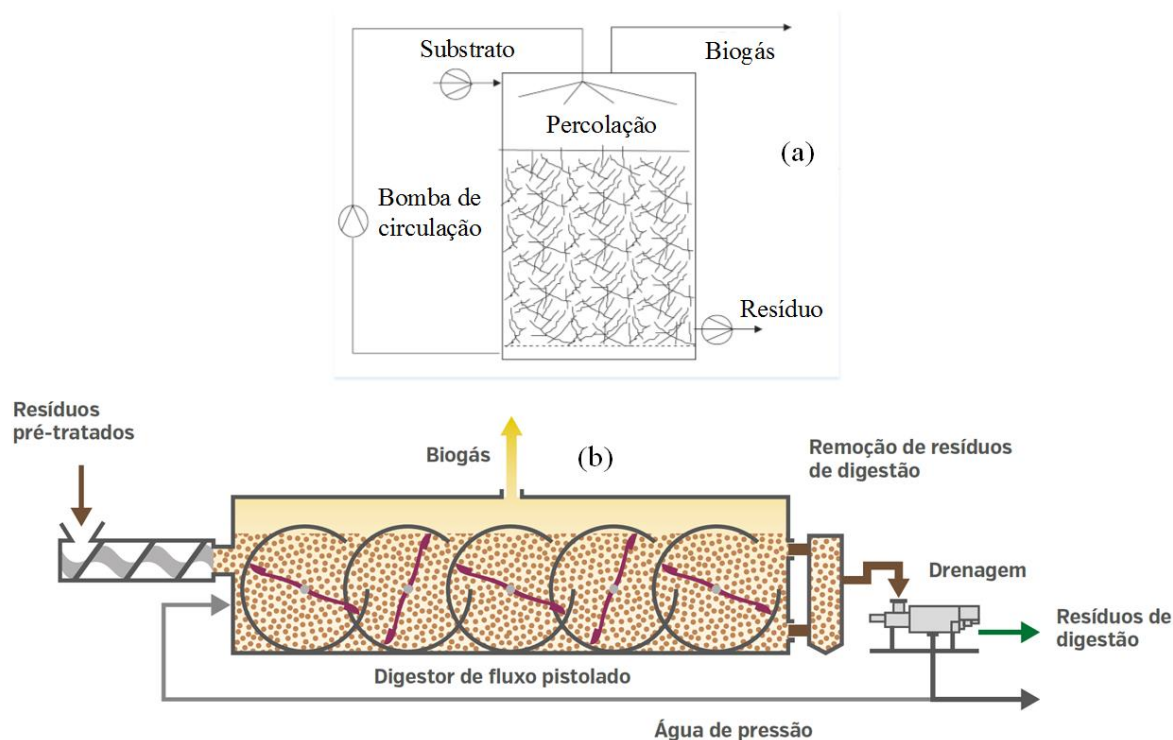


Figura 3.2 – Reatores de alimentação contínua: (a) reator DRANCO® de fluxo pistonado vertical; (b) reator de fluxo pistonado horizontal

Fonte: [71,90]

### 3.1.2.2. Reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB)

Os reatores tipo UASB por suas siglas em inglês “*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*”; foi desenvolvido por volta dos anos 1980 por Letinga, na Holanda (1980-1983) com a finalidade de converter águas residuais com alto conteúdo de carboidratos em biogás [41,71]. É feito de um tanque cilíndrico vertical, construído em três fases para a separação efetiva de gás, líquidos e sólidos (lodos). O esgoto é bombeado para dentro da parte inferior do reator e flui para a parte superior. Uma boa mistura do conteúdo do reator e o contato com os microrganismos são asseguradas pelo fluxo de líquido e o desenvolvimento de bolhas de biogás. Estruturas de

separação de gás, líquido e sólido são colocadas no topo do reator que fazem reduzir a velocidade das lamas e sedimentar sob a forma de pellets no fundo (vide Figura 3.3). Este tipo de biodigestor é amplamente difundido na fermentação anaeróbia de efluentes.

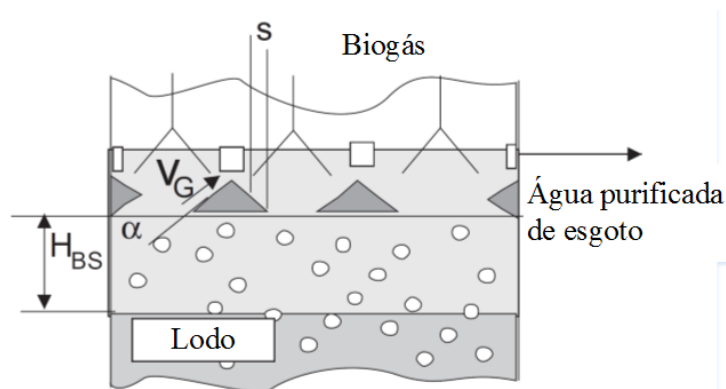


Figura 3.3 – Reator anaeróbios de fluxo ascendente (UASB)

Fonte: [71]

### 3.1.2.3. Reator contínuo de mistura completa (CSTR)

O reator CSTR, por suas siglas em inglês “*Continuous Stirred Tank Reactor*”, é um reator contínuo de mistura completa que não retém a biomassa, permitindo a mistura homogênea de substratos (vide Figura 3.4). A operação em reatores com agitadores é limitada apenas a substratos bombeáveis e, portanto, a carga orgânica volumétrica máxima diminui em comparação com outro tipo de reatores. Este tipo de sistema é apropriado para águas residuárias com uma alta concentração de lamas ou extremamente elevada concentração de materiais orgânicos solúveis. Ele reage com alta sensibilidade ao choque de perturbações ou substâncias tóxicas nas águas residuais, não sendo normalmente econômico para o tratamento de águas residuais [27,71]. A unidade pode estar equipada com um tanque para a hidrólise e o biorreator, e pode ser construído com um sistema compacto que permita o armazenamento de biogás.

Os reatores CSTR de mistura completa são normalmente operados sob condições mesofílicas ou termofílicas com trocadores de calor, com vantagens que incluem, relativamente fácil de construir e operar, capaz de digerir fluxos elevados de resíduos sólidos. A principal desvantagem dos digestores de mistura completa é a sua baixa eficiência devido a seu alto TRH,

necessário para executar a digestão anaeróbia [41]. No entanto, o reator CSTR é um dos biodigestores com tecnologia padrão mais comumente utilizado nas usinas de biogás para processar resíduos orgânicos, substratos agrícolas e resíduos orgânicos industriais [41,90].

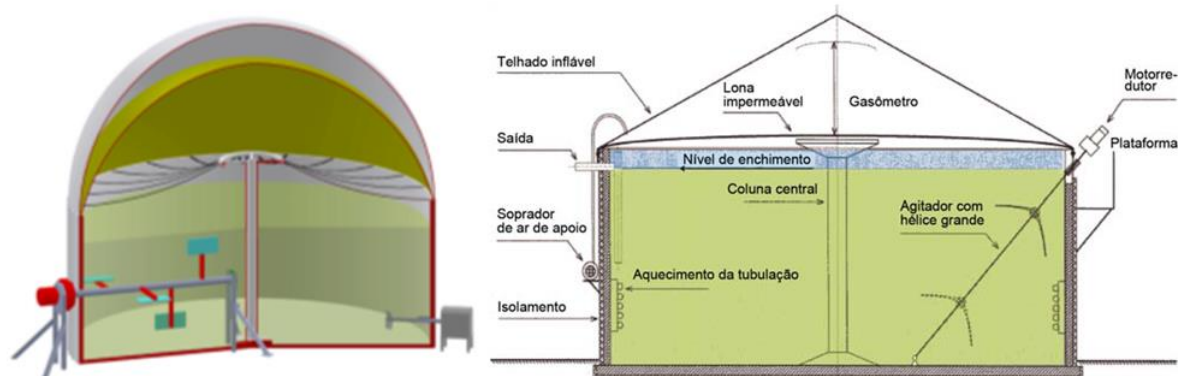


Figura 3.4 – Reator contínuo de mistura completa (CSTR)

Fonte: [27,90]

#### 3.1.2.4. Reatores em batelada (batch reator)

Este tipo de reator funciona por carga e descarga, enchendo completamente o reator com substrato fresco e, uma vez finalizado o processo de decomposição, se descarrega completamente. O substrato permanece no reator até o final do tempo retenção selecionado, sem que haja retirada ou adição de mais substrato. Ao fim do tempo de retenção, o biodigestor é esvaziado e enchido com substrato fresco, e uma parte do material decomposto pode servir para inocular a carga seguinte e permanecer no biodigestor [27].

Na prática, o processamento em batelada com biodigestor simples tem pouca relevância, tendo aplicação em biodigestores do tipo garagem (vide Figura 3.5). Em comparação com a digestão nos reatores contínuos ou de mistura completa, os sistemas que operam em batelada geralmente provocam maiores níveis de emissões devido à operação descontínua de plantas de biogás [90]. Os reatores em batelada também podem operar em digestão seca, sendo um exemplo disso os biodigestores tipo BEKON® geralmente para o tratamento de resíduos orgânicos ou biomassa.

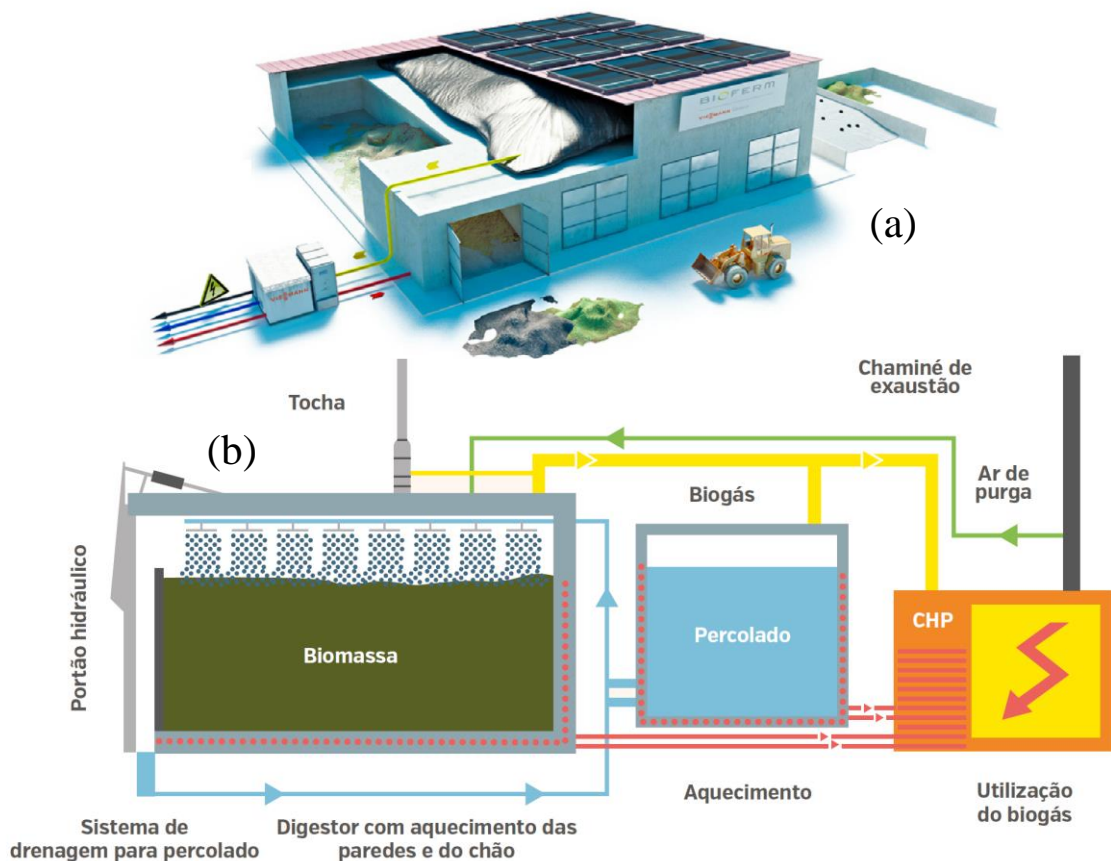


Figura 3.5 – Digestores em batelada: (a) digestores de baia ou tipo garagem; (b) tecnologia de digestão BEKON®

Fonte: [90]

### 3.1.3. Temperatura do processo

A temperatura do processo é uma condição para a seleção da tecnologia de digestão anaeróbia, sendo que pode ser definido como psicrófila, mesófila e termófila (vide secção 2.5.5). Processos termofílicos tem alguns desvantagens como pouco incremento dos microrganismos, altas taxas de mortalidade, e falta de diversidade dos microrganismos, além de ser mais susceptíveis às mudanças de temperatura [43]. Os processos de digestão anaeróbia mesofílicos são, em geral mais populares, porque são fáceis de começar sua operação, têm um rendimento estável e sua atividade microbiana é relativamente alta [41].

### 3.1.4. Número de fases do processo

As fases do processo de digestão anaeróbia podem variar dependendo da tecnologia utilizada, não existindo um padrão para a utilização de uma determinada quantidade de fases. Comumente algumas usinas podem separar as fases do processo em relação ao meio biológico ou estágios biológicos (vide Figura 3.6). Assim as usinas de biogás geralmente podem classificar-se em usinas monofásicas e usinas bifásicas, sendo que nas usinas monofásicas o processo de hidrólise (+acidogênese e acetogênese) e metanogênese é realizado em um único reator e no caso do sistema bifásico a hidrólise (+acidogênese e acetogênese) e a metanogênese são realizados em reatores diferentes, com suas respectivas condições específicas de processo, como valor do pH e temperatura [27].

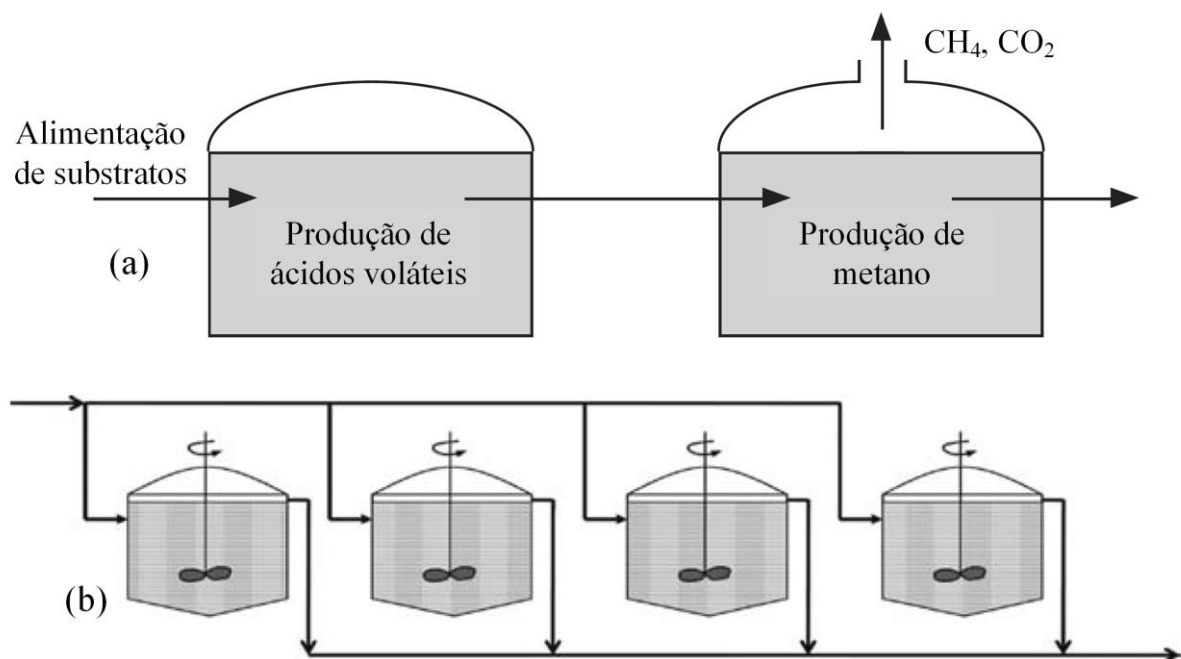


Figura 3.6 – Digestão anaeróbia em fases: (a) digestão anaeróbia de fluxo contínuo em duas fases; (b) digestão anaeróbia de várias fases em batelada

Fonte: [43]

Alguns autores afirmam que a acumulação de hidrogênio, queda do pH ou a toxicidade por causa do incremento de ácidos graxos voláteis, como o ácido propiônico, pode ser superada usando um sistema digestor anaeróbico de duas fases [43]. Segundo Fezzani et al [91], num

estudo de digestão anaeróbia de esgotos urbanos, o sistema de digestão anaeróbia de duas fases tem melhor desempenho na produtividade metano, melhores remoções de fenol e melhor qualidade de efluentes comparado com o métodos convencionais de digestão anaeróbia de uma fase [91]. No entanto, em usinas agrícolas de produção de biogás a maioria dos sistemas utiliza o sistema monofásico [27], devido também aos altos custo de investimento que implicaria a instalação dos sistemas de duas fases, tendo em consideração que para estes sistemas, as usinas de biogás teriam que estar altamente automatizadas para o melhor controle dos estágios biológicos.

### **3.2. Unidades agrícolas de digestão anaeróbia**

As unidades agrícolas de digestão anaeróbia são aquelas que estão destinadas a tratar matérias-primas de origem agrícola, sejam estes resíduos agrícolas ou provenientes das colheitas. As matérias-primas mais comuns para este tipo de usinas são o estrume e chorume de animais, resíduos vegetais e produtos vegetais, culturas energéticas dedicadas (CED), mas também vários resíduos das indústrias de alimentos e de pesca, etc. A produção de estrume e chorume de gado e porco são as matérias-primas básicas para a maioria das instalações de biogás agrícolas na Europa, embora o número de usinas que funcionam com CED tenha aumentando nos últimos anos [48].

A produção de biogás pode ser efetuada em reatores muito pequenos, que variam de frascos de 100 mL de soro em laboratórios, até grandes digestores com 10.000 m<sup>3</sup>, como normalmente são utilizados na Europa [70]. A produção de biogás pode ser a pequena escala para usinas com potências elétricas instaladas menores a 500 kWe ou em grande escala para usinas com potências elétricas instaladas superiores a 500 kWe [92,93]. No entanto, o tamanho das usinas de biogás no Reino Unido são definidas pelas regulações tarifárias tendo que usinas de biogás de pequena escala são as que tem potências instaladas até 250 kWe, média escala com potências instaladas de 250-500 kWe e usinas de grande escala as que tem potências instaladas de 500 kWe até 5 MWe [94].

O tamanho da usina depende das circunstâncias locais, tendo que os biodigestores domésticos são adequados para regiões em desenvolvimento ou regiões rurais, onde os residentes vivem longe uns dos outros, enquanto biodigestores de médio e grande porte (Medium and Large-Scale Biogas Plants - MLBPs) são adequados para regiões mais desenvolvidas, onde as pessoas moram perto umas de outras [95]. A operação e manutenção dos biodigestores domésticos são mais simples, e os seus desempenhos ambientais e económicos são superiores em comparação com os biodigestores de médio e grande porte (MLBPs). No entanto, MLBPs têm maior eficiência energética [95].

As unidades de digestão de dejetos animais, são classificadas como instalações de biogás agrícolas, e elas geralmente fazem co-digestão de esterco e outros resíduos orgânicos adequados, muitos deles de origem agrícola também. A classificação comum das instalações de biogás agrícolas segue: (1) a grande escala, instalações de co-digestão conjunta e (2) as plantas de escala produtiva. Não há uma delimitação clara entre essas duas categorias, como elementos de tecnologia de uma categoria sendo comuns para a outra [14].

No entanto, na atualidade existem a nível mundial diferentes tipos e modelos de biodigestores, de diferentes tamanhos, desde os de grande tamanho, os quais encontram-se na maioria de casos com parâmetros de ingresso da biomassa, saída de efluentes, pH, tempo de retenção automatizados; biodigestores de médio porte, os quais contam com um sistema de bombeamento e/ou recirculação do efluentes e que por sua magnitude vão servir para a geração de energia elétrica e os biodigestores de pequeno tamanho, os quais em geral vai-se utilizar para cocção de alimentos [36,48,50].

### **3.2.1. Biodigestores de uso doméstico (family-scale/household digesters)**

Os biodigestores de uso doméstico (vide Figura 3.7) são simples, baratos e de fácil operação e manutenção, e podem ser construídos com materiais produzidos localmente. Normalmente, não existem instrumentos de controle e não há processos de aquecimento, operando a temperaturas psicrófilicas ou mesófilicas dependendo do clima, tendo na maioria dos casos longos de tempos de retenção hidráulico [48].

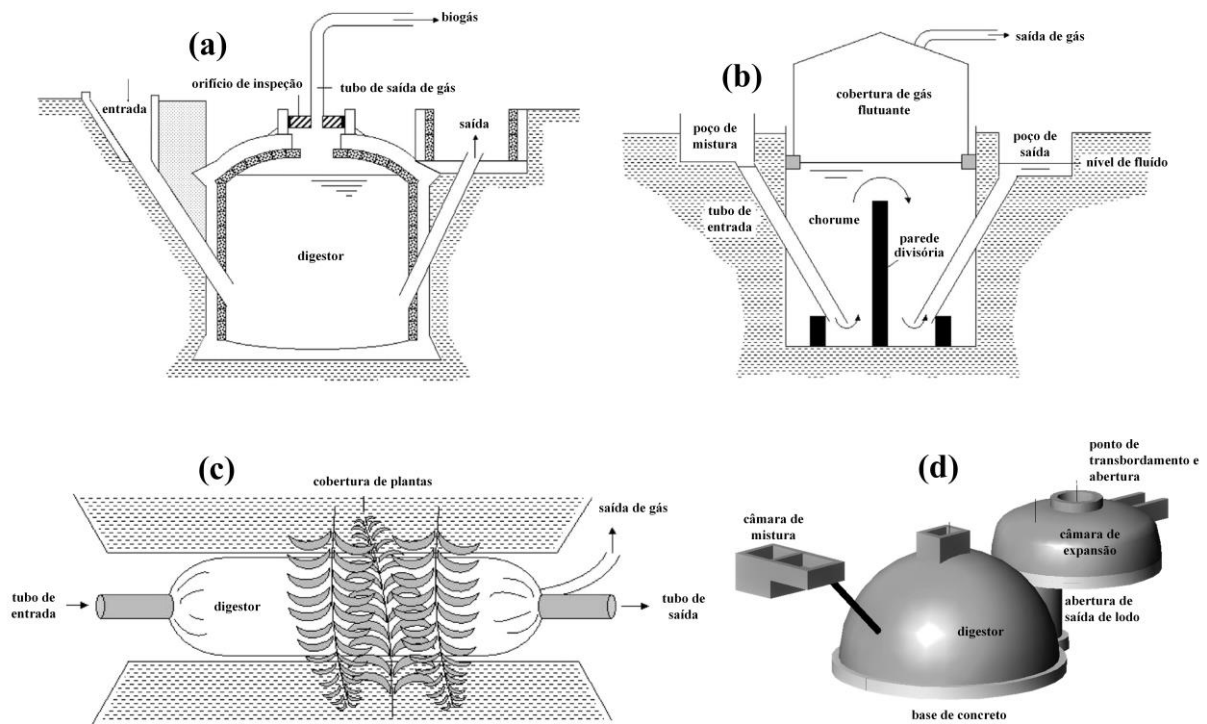


Figura 3.7 – Principais tipos de biodigestores rurais: (a) biodigestor chinês, (b) biodigestor indiano, (c) biodigestor taiwanês e (d) biodigestor camartec (africano).

Fonte: adaptado de [96,97]

Estes tipos de biodigestores são de pequena escala e inicialmente foram desenvolvidos em países como China e Índia, países que têm operando milhões de biodigestores utilizando tecnologias simples [48]. O biogás gerado é utilizado para iluminação e cozimento de alimentos nos fogões domésticos. São geralmente construídos nos prédios rurais, onde tem algum tipo de rejeito animal como esterco de gado bovino ou porco [50,98]. Estima-se que em 2015 na China, o número total de biodigestores será de 60 milhões com uma produção anual de biogás de aproximadamente 23,3 bilhões de  $m^3$  [99].

Estes biodigestores também foram introduzidos no continente africano mudando de nome e tendo adaptações de acordo aos materiais e recursos existente no lugar. Na África se desenvolveram biodigestores domésticos através de programas nacionais de biogás doméstico, como o Programa Africano de Biogás Doméstico “The Africa Biogas Partnership Programme (ABPP)”, que envolve programas de biogás doméstico nos países de Etiópia, Quênia, Tanzânia,

Uganda e Burkina Faso, onde na atualidade se encontram mais de 70.000 unidades, sendo o tipo de biodigestor utilizado o Camartec e Camartec Modificado [96,98,100,101].

Na América do sul existem experiências de utilização de biodigestores domésticos tipo chinês, taiwanês e de plástico, este último operando em condições climáticas de frio extremo e altitudes por encima de 3000 metros sobre o nível do mar [50]. Na América Central e do Sul através de programas domésticos de biogás, se está incentivando a construção de biodigestores domésticos com a finalidade de substituição do consumo de madeira e diminuição de doenças ocasionadas pela queima incontrolada da lenha [102,103].

### **3.2.2. Biodigestores de uso produtivo (farm-scale)**

Este tipo de biodigestor também chamado de produção descentralizada, são de pequena ou média até grande escala, sendo chamado assim porque o biodigestor se encontra ligado apenas a uma fazenda, digerindo a matéria-prima produzida na mesma fazenda. Alguns biodigestores de uso agrícola também fazem a co-digestão de pequenas quantidades de substratos ricos em metano (por exemplo, resíduos de hidrocarbonetos, provenientes de indústrias de peixe ou resíduos de óleo vegetal), com o objetivo de aumentar o rendimento de biogás. Também é possível que uma usina de biogás de uso produtivo receba e processe chorume provenientes de explorações agrícolas ou dos vizinhos (por exemplo, através de tubulações conectando essas fazendas a uma só unidade de digestão anaeróbia) [14,48].

Existem muitos conceitos para biodigestores de uso produtivo em todo o mundo. Na China existem biodigestores com volumes de 3.000 m<sup>3</sup>, como na cidade de Sanhe (província de Hebei, China), o qual é alimentado com 20.075 toneladas por ano de estrume de 4.600 cabeças de gado bovino. Segundo estimações feitas por Duan et al [99], na China, a quantidade de biodigestores de uso produtivo de grande porte para o ano 2015 foi de aproximadamente 8.000 unidades, com uma produção de 670 milhões de m<sup>3</sup> de biogás.

Um dos fatores que determina o tamanho do biodigestor é, o tempo de retenção hidráulico, sendo comumente TRH de 20 a 40 dias para este tipo de biodigestores, mas depende do tipo de substrato e da temperatura da digestão [48,104]. Além do tamanho dos biodigestores, a principal característica na maioria de casos é a utilização de mono-substratos, os quais são

adicionados principalmente da mesma exploração pecuária. Estes biodigestores podem ser de tipo horizontal ou biodigestores “dois em um” (vide Figura 3.8). Estes últimos são utilizados na maioria dos biodigestores por sua praticidade e por permitir o armazenamento de biogás no mesmo biodigestor [27,48].

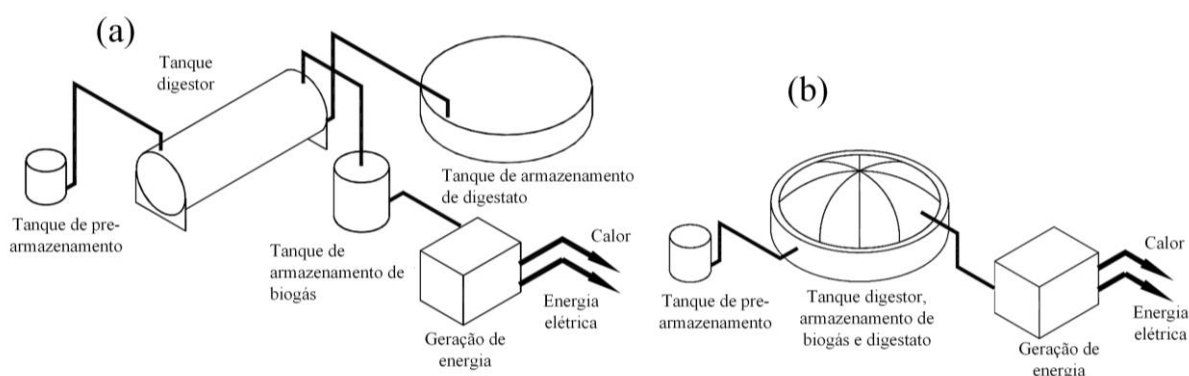


Figura 3.8 – Representação esquemática de biodigestores de uso produtivo: (a) biodigestor horizontal de aço e (b) biodigestor “dois em um”, com cobertura de geomembrana.

Fonte: adaptado de [48]

Na Europa, países como a Alemanha, Áustria e Dinamarca estão entre os pioneiros da produção de biogás de uso produtivo. O interesse dos agricultores europeus em aplicações de digestão anaeróbia está crescendo hoje em dia, não só porque a produção de biogás agrícola transforma os resíduos em recursos valiosos e produz adubo de alta qualidade, mas também porque cria novas oportunidades de negócios para os agricultores envolvidos e lhes dá um novo status, como fornecedores renováveis de energia [48].

Nestes biodigestores o calor e a eletricidades são aproveitadas, cerca de 10 a 30% do calor e da eletricidade produzida é utilizada para operar a unidade de biogás e para as necessidades internas do agricultor, enquanto o excedente é vendido para empresas de energia elétrica e para fazendas próximas que necessitem calor e eletricidade [48].

No Brasil, os projetos desenvolvidos para biogás de uso produtivo, na maioria dos casos, foram construídos com base nas experiências das décadas anteriores e com a utilização dos biodigestores tipo canadense (vide Figura 3.9), que é um biodigestor tubular de fluxo pistonado

(plug-flow), onde a biomassa entra de forma contínua através de uma das extremidades do biodigestor, passa através do mesmo e é descarregada na outra extremidade.



Figura 3.9 – Biodigestor tipo canadense instalado em IFSULDEMINAS – Campus Muzambinho

Fonte: [105]

Neste tipo de biodigestor a biomassa permanecem por um período de tempo antes de sair do biodigestor, e para garantir a degradação completa da biomassa os biodigestores são longos, com uma elevada relação comprimento/largura, tendo uma largura maior que a profundidade. Sua área de exposição ao sol é maior, e com isso é maior a produção de biogás [105]. O armazenamento do biogás se dá no próprio biodigestor, que tem sua cúpula de um material geosintético de PVC (geomembrana), que armazena a produção de gás [105,106].

### 3.2.3. Biodigestores centralizados (joint co-digestion)

Estes biodigestores são de médio até grande porte e estão baseados na digestão de estrume e chorume de animais coletados de uma ou várias fazendas e transportadas até uma planta centralizada [48]. Além disso, neste tipo de biodigestão se faz a co-digestão<sup>13</sup>, que é a digestão simultânea de uma mistura homogênea de dois ou mais substratos, tendo uma quantidade

---

<sup>13</sup> A expressão co-digestão é aplicada independentemente da proporção dos seus respectivos substratos utilizados simultaneamente.

principal de substrato de base (por exemplo, estrume ou chorume de animais) que é misturado e digerido em conjunto com quantidades menores de um único, ou uma variedade de substratos adicionais [19].

Estes biodigestores podem, além de produtos agrícolas, fazer digestão de resíduos orgânicos das indústrias alimentares. As unidades de biodigestão centralizadas são geralmente de grande escala, com capacidades que variam segundo cada biodigestor, por exemplo, desde algumas centenas de m<sup>3</sup> até vários milhares de m<sup>3</sup>. Um dos países pioneiros no desenvolvimento de unidades de biogás agrícolas para esterco e resíduos orgânicos por co-digestão é a Dinamarca, onde o conceito de unidade de biogás centralizada foi desenvolvido ao longo das duas últimas décadas e representa hoje um sistema integrado de tratamento de estrume e resíduos orgânicos, reciclagem de nutrientes e produção de energia renovável, gerando benefícios agrícolas e ambientais [14].

Na Figura 3.10 pode-se ver o ciclo sustentável de co-digestão anaeróbia onde a biomassa pode utilizar-se tanto como insumo para o processo de digestão anaeróbia e também para alimentação dos animais, os quais a sua vez também fornecem os dejetos para o biodigestor. O biodigestor gera energia eletricidade e calor, tendo como subproduto gases de efeito estufa, tais como o dióxido de carbono, os quais são absorvidos pela biomassa que serviu para o processo de digestão e alimentação animal, fechando dessa forma o ciclo ambiental.

A digestão anaeróbia centralizada foi testada inicialmente na Dinamarca, onde até 2003 existiam 20 plantas em operação, todas com estrume animal como o principal substrato. A ideia também foi utilizada na Suécia, onde as plantas de tratamento de efluentes passaram a utilizar co-substratos em seus tanques de digestão anaeróbia. Atualmente, a digestão centralizada tornou-se uma tecnologia padronizada que é utilizada na maioria dos países da Europa, bem como na Ásia e nos Estados Unidos [25,48]. As unidades de biogás na Dinamarca, particularmente usinas centralizadas de grande escala, incluem pequenos laboratórios no local, para medir o teor de matéria seca, matéria orgânica seca e o pH das amostras de todas as cargas nos digestores [48,107].

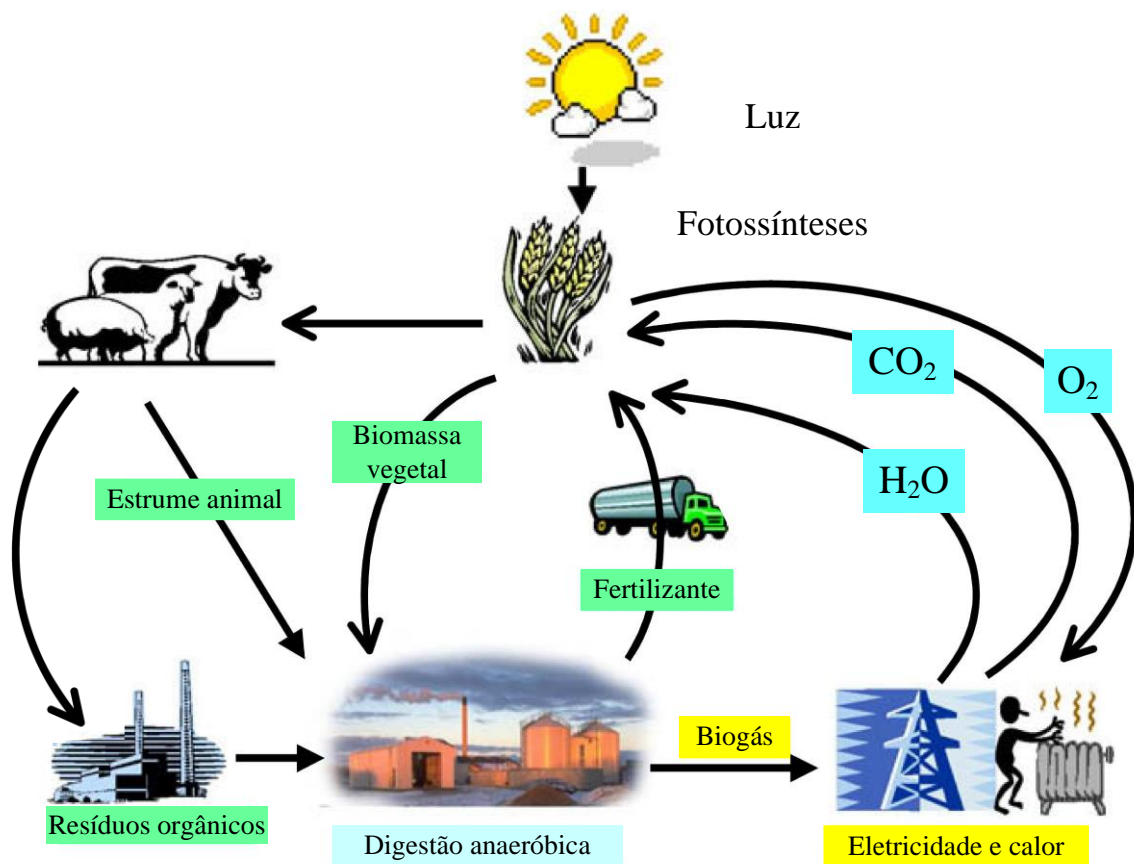


Figura 3.10 – Representação esquemática de ciclo sustentável de co-digestão anaeróbia de estrume animal e resíduos orgânicos

Fonte: adaptado de [14]

Existem dois principais motivos que contribuíram para promover a co-digestão: os digestores nas estações de tratamento de efluentes que foram geralmente sobre dimensionados e a adição de co-substratos, que ajuda a produzir mais biogás e, conseqüentemente mais eletricidade, com um custo adicional pequeno em comparação como a produção de biogás apenas a partir de dejetos agrícolas (que possuem um rendimento de biogás relativamente baixo) [25]. Na Dinamarca existem plantas de co-digestão a grande escala com volumes de biodigestores que vão desde 4.650 - 6.000 m<sup>3</sup> e têm tempos de retorno do investimento entre 3 e 10 anos [19].

Desta forma, a co-digestão centralizada representa um sistema integrado de produção de energias renováveis, tratamento de resíduos orgânicos e reciclagem de nutrientes, como é amostrado na Figura 3.11. A experiência mostra que o sistema é capaz de gerar benefícios

agrícolas, ambientais e econômicos para os agricultores envolvidos e para a sociedade em geral, tais como:

- Produção de energias renováveis
- Reciclagem barata e ambientalmente segura de estrume e resíduos orgânicos
- Redução das emissões de gases de efeito estufa
- Melhoria da segurança veterinária através do saneamento dos dejetos
- Melhoria da eficiência de fertilização
- Menos desconforto pelos odores e moscas
- Benefícios econômicos para os fazendeiros

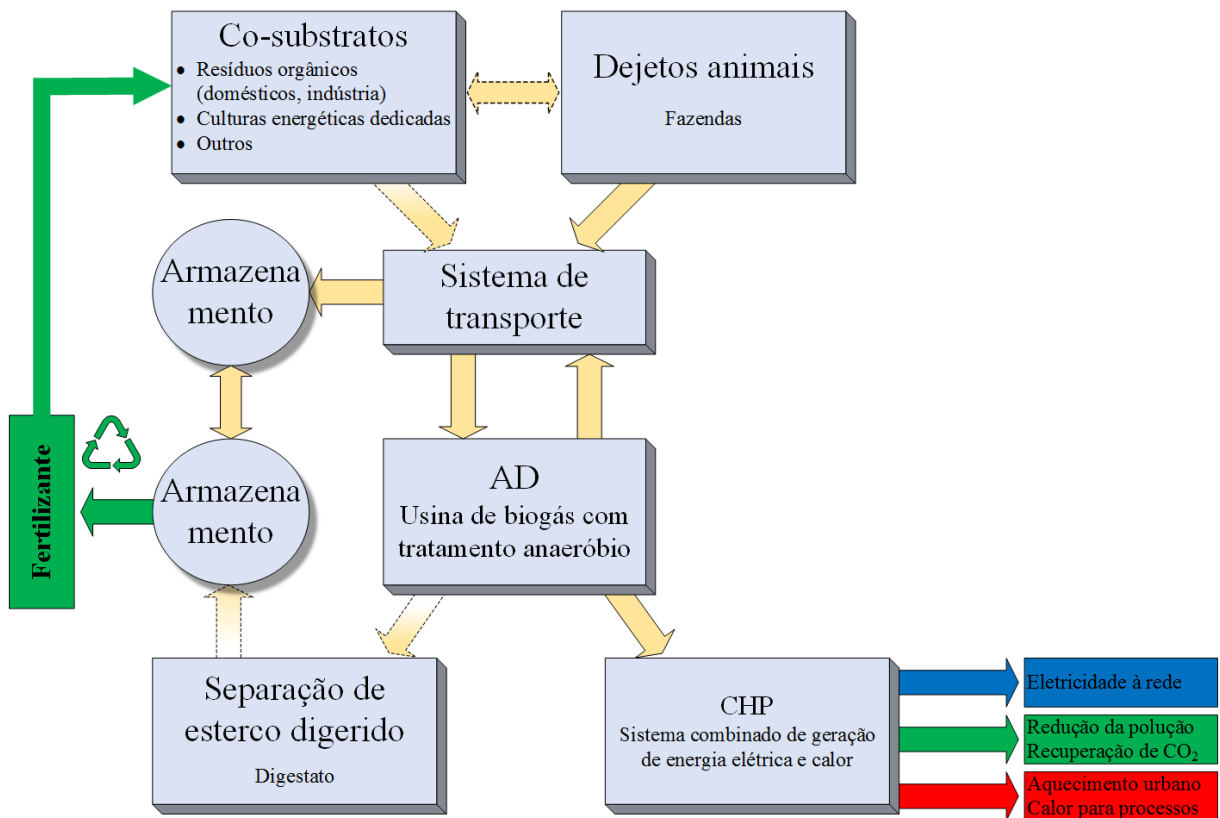


Figura 3.11 – Conceito de sistema de digestão anaeróbia centralizada

Fonte: adaptado de [108]

Na Dinamarca existe uma usina de biogás chamada Lemvig Biogas (vide Figura 3.12), que desde 1992, produz calor e eletricidade do tratamento do estrume de aproximadamente 75 fazendas e os produtos residuais da produção industrial. Isto resulta numa economia

considerável. Além disso, Lemvig, gera mais de 21 milhões de kWh de eletricidade por ano a partir do biogás produzido [109].



Figura 3.12 – Usina de biogás Lemvig, Dinamarca

Fonte: [109,110]

### 3.3. Substratos para digestão anaeróbia

Dos substratos para produção de biogás, existem, os bens conhecidos, como os dejetos animais de bovino [20,104,111], suínos [31,112,113] ou aves [77,114], até os substratos menos conhecidos, como são os resíduos de manga, banana, laranja, mandarim, uva, romã, tomates, cebola, cenoura [65,67,115], etc. Na Europa, é comum que usinas agrícolas de produção de biogás utilizem a digestão conjunta de dejetos animais com algum co-substrato para maximizar a produção de biogás, sendo a maioria a grande escala [116].

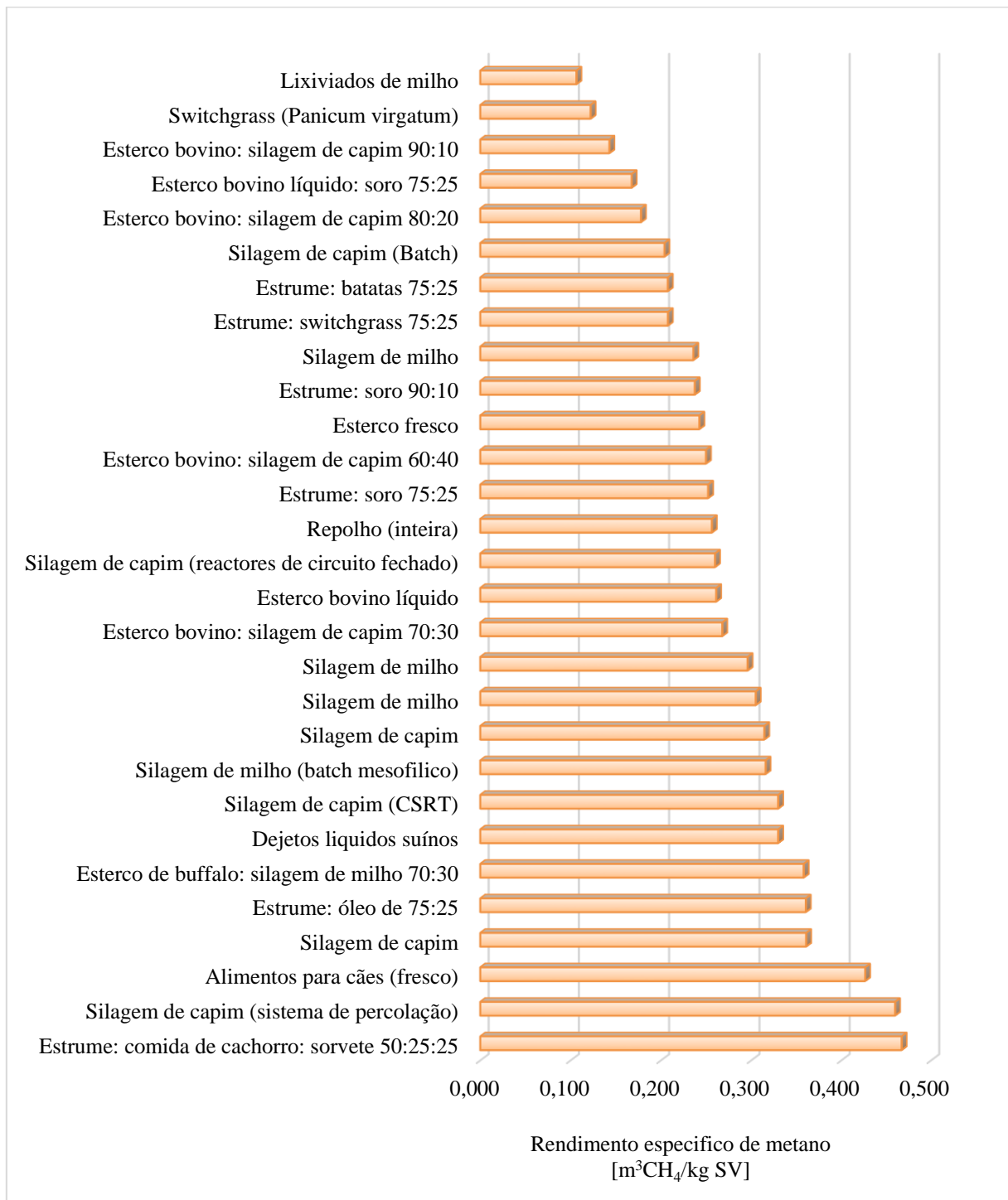


Figura 3.13 – Rendimento específico de metano de diferentes substratos e mistura de substratos em base ao % de sólidos voláteis

Fonte: adaptado de [23,117,118,119,120,121,122,123]

O potencial de produção de biogás destes substratos geralmente é obtido por ensaios em laboratórios através de um método denominado potencial bioquímico de metano “Biochemical Methane Potential (BMP)”, que determina a biodegradabilidade anaeróbia dos compostos orgânicos e o valor experimental de produção máxima de metano gerado com uma quantidade conhecida de substratos [117,124,125,126]. Na Figura 3.13, pode-se ver o rendimento específico de metano de alguns substratos e mistura de substratos avaliados por diferentes autores.

### 3.3.1. Dejetos animais

Os dejetos animais são os substratos mais comumente utilizados para a produção de biogás. Existem experiências da produção de biogás a partir de dejetos animais em tecnologias de pequena escala com utilização de dejetos de animais como estrume de ovelhas, lhamas [127] e até elefantes [71]. As tecnologias a grande escala em geral utilizam substratos comumente conhecidos como os dejetos de bovinos e suínos.

As características dos dejetos animais para produção de biogás depende das condições de cria das espécies e podem ser afetadas por: tipo de alimentação, condições de cria dos animais, sexo, raça ou tipo de animal, temperatura, umidade, digestibilidade, conteúdo de fibras, além de o sistema de coleta e a atividade bioquímica do dejetos [15,128]. A produção de biogás dos dejetos animais, principalmente suínos e bovinos, se deve basicamente à quantidade excedente de energia contida nas rações que eles comem, aproveitando uma percentagem e dejetando a diferença, a qual é aproveitada para produção de biogás.

Os dejetos suínos, geralmente tem elevados teores de nitrogênio, o qual é prejudicial para o processo de produção de biogás devido ao risco de inibição [17,129], tendo que a relação C:N destes animais pode estar no intervalo de 12-15, enquanto o dejetos bovino pode ter intervalos de relação de C:N de 11-30 [74]. No entanto, para o caso brasileiro, a relação C:N para bovinos pode estar perto aos valores de 15,44:1 [130].

O mecanismo do processamento gastrointestinal dos animais ruminantes, como o bovino (vide Figura 3.14), pode produzir o que se denomina como fermentação entérica [131,132], produzindo uma quantidade significativa de metano. Estima-se que no mundo os GEE a partir

da criação do gado bovinos representam 7,1 Gton de CO<sub>2</sub>Eq por ano, sendo a 14,5% de todas as emissões antropogênicas [16], e no Brasil, 22,5% (270,8 Mton CO<sub>2</sub>Eq ao ano) de todas as emissões no país são atribuídos à fermentação entérica e ao manejo de dejetos animais [13].

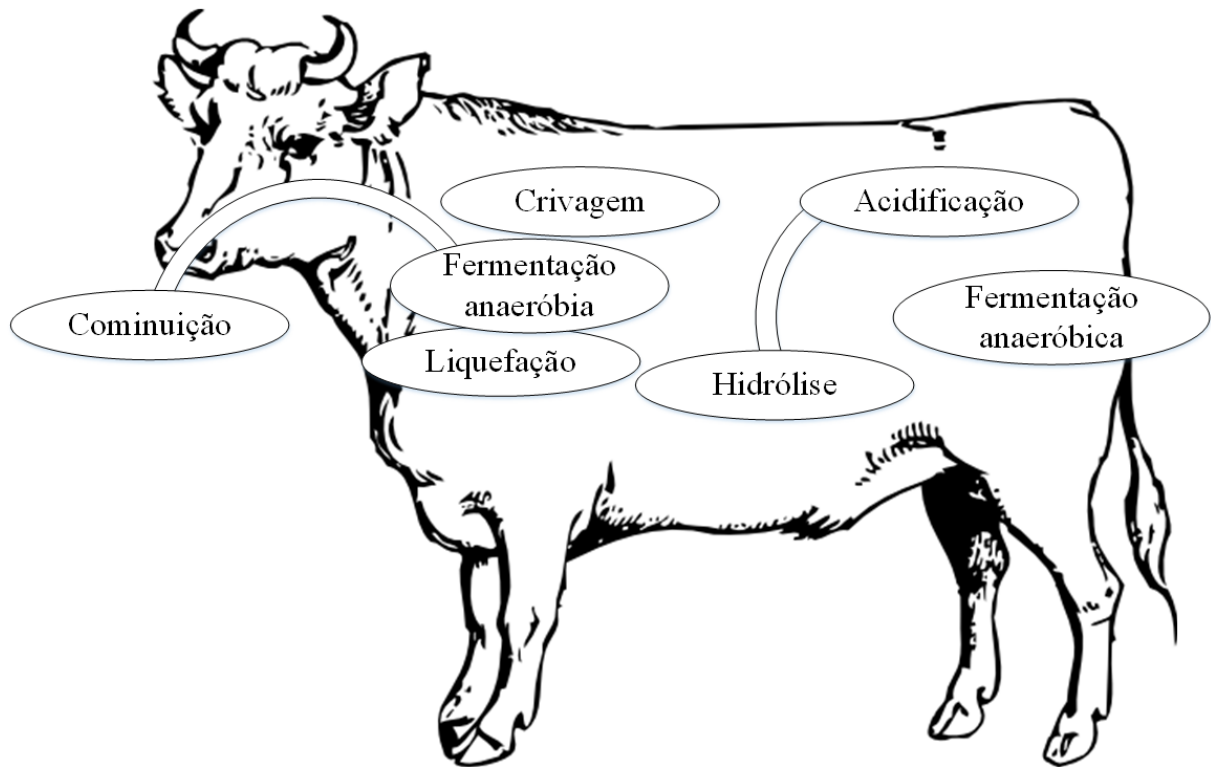


Figura 3.14 – Processamento gastrointestinal de rações dos bovinos

Fonte: adaptado de [71]

Segundo cálculos feitos a partir de dados fornecidos por Zanette [25], e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [133], o potencial de produção de metano a partir dos dejetos animais no Brasil pode chegar até 69,95 milhões de metros cúbicos por dia, dos quais os gados bovinos representam um potencial de 56,02 milhões de metros cúbicos por dia, que poderiam ser aproveitados para a geração de energia elétrica (vide Tabela 3.2). No entanto é preciso que, para aproveitar todo o potencial de produção de metano, se tenham sistemas de colheita e estábulos que permitam um melhor recolhimento dos dejetos, sendo que para o contexto atual só será possível o aproveitamento dos animais que se encontram confinados em um só lugar, tais como os suínos, gados de leite e gados em confinamento, logo, o potencial real pode ser menor.

Tabela 3.2 – Potencial de produção de metano a partir de dejetos animais no Brasil

| Categoria                           | IBGE (2006, apud Zanette, 2009) [25] |  |                 | IBGE (2014) [133]         |  |                 |
|-------------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------|---------------------------|--|-----------------|
|                                     | Animais x 10 <sup>6</sup>            | Metano x 10 <sup>6</sup> [m <sup>3</sup> /dia] | Porcentagem [%] | Animais x 10 <sup>6</sup> | Metano x 10 <sup>6</sup> [m <sup>3</sup> /dia] | Porcentagem [%] |
| Bovinos total                       | 206,60                               | 54,50  | 81,83           | 212,34                    | 56,02  | 80,08           |
| <i>Bovinos de corte – extensiva</i> | 185,00                               | 46,40  | 69,67           | -                         | -  | -               |
| <i>Bovinos de leite</i>             | 20,60                                | 7,80   | 11,71           | -                         | -  | -               |
| <i>Bovinos em confinamento</i>      | 1,00                                 | 0,30   | 0,45            | -                         | -  | -               |
| Suínos                              | 34,10                                | 3,00   | 4,50            | 37,93                     | 3,34   | 4,77            |
| Frangos                             | 999,00                               | 4,80   | 7,21            | 1.331,05                  | 6,40   | 9,14            |
| Ovinos                              | 15,90                                | 0,70   | 1,05            | 17,61                     | 0,78   | 1,11            |
| Caprinos                            | 10,30                                | 0,50   | 0,75            | 8,85                      | 0,43   | 0,61            |
| Equinos                             | 5,80                                 | 2,60   | 3,90            | 5,45                      | 2,44   | 3,49            |
| Bubalinos                           | 1,20                                 | 0,50   | 0,75            | 1,32                      | 0,55   | 0,79            |
| Total                               | 1.272,90                             | 66,60  | 100,00          | 1.614,56                  | 69,95  | 100,00          |

Fonte: adaptado de [25,133]

### 3.3.2. Culturas Energéticas Dedicadas (CED)

As culturas energéticas dedicadas (CED), são culturas plantadas com a finalidade de aproveitamento integral para a produção de energia pela queima de sua biomassa [134], ou também como substratos nos processos de digestão anaeróbia [135]. As culturas energéticas dedicadas têm, em geral quantidades elevadas de carbono em relação ao nitrogênio, o que permite que estas, ao serem misturadas com substratos que contem baixo teor de carbono, como os dejetos animais, podem chegar a ter valores equilibrados de carbono e nitrogênio, o que pode permitir um ótimo desempenho dos processos de digestão anaeróbia.

Estas culturas energéticas dedicadas, ricas em carbono, utilizadas como co-substratos conjuntamente com estrume de suíno o gado podem incrementar a produção de biogás significativamente [22,23]. Cada vez são há mais usinas agrícolas que adicionam culturas energéticas como milho, capim, girassol, beterraba, etc., sendo que estas podem ser utilizadas como co-substratos ou como substrato principal, ou, em alguns casos, como um único substrato [19]. Atualmente existe uma tendência global pela utilização de culturas energéticas dedicadas para a produção de biogás, geralmente em usinas de digestão agrícola, onde os dejetos dos

animais são misturados com culturas, sendo as mais utilizadas, os silagens de milho e capim elefante (*Pennisetum purpureum*) [73]. Na Alemanha e na Áustria a silagem de capim é utilizado em mais do 50% das usinas de biogás, sendo a segunda matéria prima mais frequentemente utilizada depois do silagem de milho [136]. Segundo dados do Oxford Institute for Energy Studies, para o ano 2012, na Alemanha, perto de 90-95% de todas as usinas de biogás utilizavam culturas energéticas como milho, capim elefante e cereais em co-digestão, principalmente com dejetos de animais [137].

O milho é uma das culturas mais espacialmente homogêneas disponível a nível mundial, [24] pelo que sua disponibilidade como co-substrato misturado com adubos animais pode resultar tecnicamente factível. No Brasil, o milho, além de variedades que são utilizadas para alimentação humana, existem variedades que podem utilizar-se como rações alimentícias para animais, como suínos e bovinos [138], sendo que só a região nordeste tem uma produção de 219.019 ton/ano de milho forrageiro (*Zea mays*) [139].

O capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) é uma gramínea forrageira com excelente potencial para a produção de matéria seca, tendo variedades com poderes caloríficos variáveis, mas com uma média de 4.200 kcal/kg para capim elefante paraíso [57]. Na região nordeste, segundo dados proporcionados por Cavalcante (2013) e extraídos do Censo Agropecuário 2006, se tem uma produção anual de 1.278.281 ton/ano [139].

Atualmente no Brasil existe um crescente interesse pela utilização do capim elefante, sendo esta utilizado nas usinas de queima de biomassa para geração de energia elétrica, sendo que a capacidade instalada das usinas de queima de capim para o ano 2014 chegou a 34 MWe [10], enquanto em abril de 2016, 3 usinas de queima de capim elefante tinham uma potência instalada conjunta de 65,7 MWe [12]. Além da utilização atual na queima de biomassa para geração de energia, tem havido um recentemente interesse em utilizá-lo como matéria-prima para as tecnologias de biorefinação lignocelulósica, no entanto, o desenvolvimento futuro destas opções dependerá da economia e desempenho ambiental da sua produção, fornecimento e processamento [140]. . Na Tabela 3.3 se pode ver as características de alguns substratos mais comuns utilizados na digestão anaeróbia, sendo que a variação dos valores, pode depender das características das plantações e processo de silagem, no caso de culturas, e de características de alimentação e raça, no caso dos dejetos de animais.

Tabela 3.3 – Características dos principais substratos utilizados na digestão anaeróbia e descritos por diferentes autores

| Substrato              | ST [%] | SV [%ST] | Rendimento específico de biogás [m <sup>3</sup> /ton SV] | Rendimento de biogás [m <sup>3</sup> /ton substrato] | Rendimento específico de metano [m <sup>3</sup> /ton SV] | Ref   |
|------------------------|--------|----------|--|--|--|-------|
| Silagem de milho       | 21,73  | 92,36    | 493,50   | 99,05  | 296,1  | [117] |
| Silagem de milho       | 28-35  | 85-98    | 390-607  | 170-230  | 234-364  | [27]  |
| Silagem de milho       | 30     | 96       | 473-647  | 81,8-111,7   | 283,8-388,2  | [119] |
| Silagem de milho       | 20-40  | 94-97    | 500-700  | 94-271,6   | 300-420  | [71]  |
| Silagem de capim       | 50     | 90,4     | 500  | 226  | 260,0  | [118] |
| Silagem de capim       | 25-50  | 70-95    | 500-563  | 170-200  | 300-338  | [27]  |
| Silagem de capim       | 15     | 86       | 588-615  | 75,9-79,3  | 352,8-369  | [119] |
| Silagem de capim       | 21-40  | 76-90    | 600-700  | 95,76-252  | 360-420  | [71]  |
| Esterco líquido bovino | 6-11   | 75-82    | 183-458  | 20-30  | 110-275  | [27]  |
| Esterco líquido bovino | 6-13   | 68-85    | 100-800  | 4,08-88,4  | 60-480   | [71]  |
| Esterco bovino fresco  | 20-25  | 68-76    | 217-550  | 60-120   | 130-330  | [27]  |
| Esterco bovino fresco  | 25-30  | 80       | 200-800  | 40-192   | 120-480  | [71]  |
| Esterco líquido suíno  | 4-7    | 75-86    | 300-600  | 20-35  | 180-360  | [27]. |
| Esterco líquido suíno  | 4,3    | 73       | 468-632  | 14,7-19,8  | 280,8-379,2  | [119] |
| Esterco líquido suíno  | 2-11   | 77-85    | 300-900  | 4,62-84,15   | 180-540  | [71]  |
| Esterco de aves        | 40     | 75       | 333-600  | 130-270  | 200-360  | [27]  |
| Esterco de aves        | 10-29  | 67-77    | 300-800  | 20,1-178,64  | 180-480  | [71]  |
| SPI de cereal          | 30-35  | 92-98    | 483-583  | 170-220  | 290-350  | [27]  |
| Grãos de cereais       | 87     | 97       | 633  | 620  | 380  | [27]  |
| Beterraba sacarina     | 23     | 90       | 567-620  | 120-140  | 340-372  | [27]  |
| Beterraba forrageira   | 16     | 90       | 553-607  | 75-100   | 332-364  | [27]  |

Fonte: adaptado de [27,71,117,118,119]

Tanto o milho e o capim elefante, além de serem utilizados nas rações animais, como silagens, podem utilizar-se como matéria-prima para a produção de biogás [119], especialmente misturadas com dejetos animais, proporcionando um ótimo e equilibrado balanço da relação C:N, e melhorando o rendimento de biogás, já que estas tem um rendimento de biogás por tonelada de matéria-prima superior aos rendimentos dos adubos tradicionais

### 3.3.3. Silagens de culturas energéticas

Para o armazenamento e posterior utilização das culturas energéticas se realiza geralmente o processo de silagem, desta maneira se consegue mantê-las em condições ótimas por longos períodos de tempo. Nas unidades de digestão anaeróbia as silagens são normalmente preparados durante a época da colheita para uso contínuo como matéria-prima ao longo do ano [137]. O processo de silagem das culturas energéticas consiste basicamente em uma fermentação em condições anóxicas para limitar a capacidade oxidativa das enzimas das plantas e evitar perdas dos nutrientes, tendo como consequência a produção de ácido láctico, o qual também é um dos precursores para a formação do biogás [20,21,141]. Segundo McEniry [142], as características de fermentação e armazenamento das silagens também pode ter influência no rendimento de biogás.

As silagens como matéria-prima para produção de biogás devem ter alguns características que permitam melhorar o rendimento do biogás, sendo que estas deveriam ser cortadas e ensiladas antes de uma completa lignificação, podendo melhorar a disponibilidade destes substratos pelo corte fino no momento da colheita, além de se agregar aditivos [139], e inóculos de bactérias que produzam ácido láctico, podendo ter um efeito significativo sobre os rendimentos de metano [73]. As silagens de boa qualidade devem conter teores de matéria seca entre 28-36%, sendo que em valores inferiores a 28% pode ocorrer percolação e a proliferação de bactérias do gênero *Clostridium*, que são responsáveis por fermentações indesejáveis e, conseqüentemente, perdas nas silagens [143], e, para valores superiores a 36% podem surgir teores excessivos de lignina, que podem inibir ou retardar o processo de digestão anaeróbia [27,144].

O processo de ensilagem de culturas energéticas deve garantir que as condições anaeróbias permitam a fermentação de carboidratos solúveis em água, por várias bactérias do ácido láctico, de maneira rápida. A silagem é preservada melhor em condições anaeróbias, onde se produzem o ácido láctico e em menor quantidade o ácido acético. Estes incrementam a acidez, com valores de pH que podem variar de 4,10 – 5,0 dependendo do teor de matéria seca. Quando as silagens são retiradas de sua cobertura para utilização, os carboidratos não fermentados e o ácido láctico e acético são metabolizados por leveduras ativas, podendo ser convertidas em dióxido de carbono e água, isto ocorre principalmente com a silagem do milho

[73]. A silagem pode ser dificilmente utilizada como mono-substrato sem que exista um tratamento prévio de neutralização, já que os intervalos ótimos para os processos de digestão anaeróbia estão entre pH de 6,1-7,8 [43]

Sendo assim, a utilização de culturas energéticas dedicadas (CED) na forma de silagem pode garantir a estabilização do ácido láctico do substrato, considerando que o processo de silagem produz ácido láctico, ácido acético, metanol, álcoois, ácido fórmico,  $H^+$  e  $CO_2$ , os quais são os precursores importantes para a formação de metano [20]. Além disso, geralmente os dejetos animais apresentam uma relação de C:N abaixo do ótimo de metanização, devido a suas elevadas concentrações de nitrogênio. Por isso, o rendimento da produção do biogás melhora significativamente quando faz a co-digestão com resíduos agrícolas ou outros substratos orgânicos com elevada relação C:N, como no caso das culturas energéticas [18].

### **3.4. Tecnologias de conversão energéticas do biogás**

A energia contida no biogás tem uma média de 20,2 MJ/kg, no entanto, a energia obtida pode variar dependendo da finalidade para qual vai ser utilizada e tipo de equipamentos que são utilizados, isto equipamentos vai determinar a eficiência na qual a energia é utilizada, tendo eficiências de utilização por equipamento de 45,32%-55,47% para fogões de gás e biogás, 3% para equipamento de iluminação, 68% para aquecedor de água com biogás, de 3%-6% nos fogões a forno aberto e 34%-42% para geração de eletricidade nos motores de combustão interna [63,145,146,147].

A energia produzida da combustão do biogás tem muitas utilizações, dependendo da natureza da fonte de biogás e a demanda local (vide Figura 3.15). Geralmente, o biogás pode ser usado para a produção de calor por combustão direta, a produção de eletricidade em células de combustível ou microturbinas, geração em Sistema Combinado de Calor e Energia Elétrica “Combined Heat and Power (CHP)”, pode ser introduzida no sistema de distribuição de gás natural ou como combustível para veículos [48]. A energia elétrica produzida em sistemas CHP pode ser vendida à rede elétrica e o calor pode ser distribuído através do sistema de aquecimento urbano para os consumidores [116].

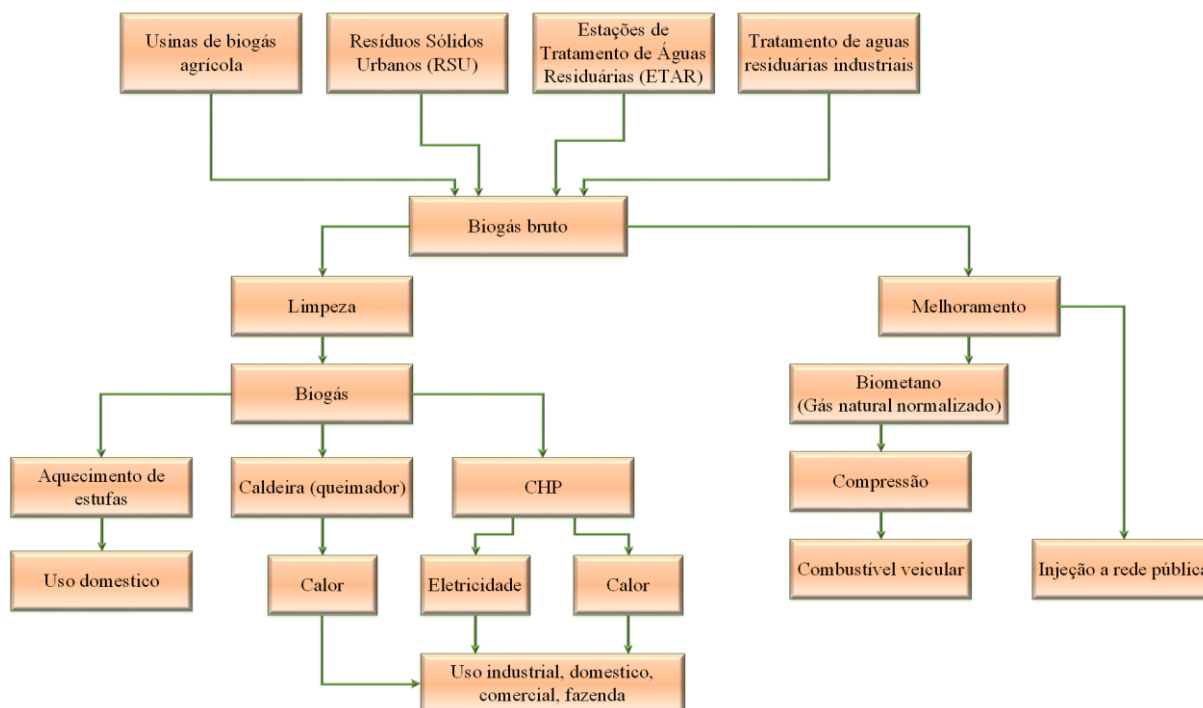


Figura 3.15 – Visão geral de utilização do biogás

Fonte: adaptado de [48]

Os sistemas de geração de eletricidade e calor (CHP) são muito comuns em unidades de biogás, já que tem as vantagens de produzir energia elétrica e calor em paralelo. Cerca de 50% dos CHPs instalados em unidades de biogás na Europa são como motores de quatro tempos e cerca de 50% com motores diesel de ignição [71,148].

Existem vários motores a gás diferentes, que normalmente são classificados em motores a gás-Otto e motores de injeção de gás-piloto. As capacidades dos motores a gás pode variar entre 10 kWe e 5 MWe. Vários fabricantes oferecem motores a gás para aplicações de biogás, como por exemplo Schnell, 2G, Rolls-Royce, Kawasaki, MTU, GE Energy (Jenbacher), Caterpillar, Perkins, MWM, Cummins, Wärtsilä, Dresser-Waukesha, Guascor ou MAN [44].

Em um motor otto-gás, a energia é convertida em energia utilizável e não-utilizável. Do total de energia aproximadamente 90% poderá ser utilizada: das quais 10% são perdas, 35% é a energia mecânica (eletricidade) e, 55% é o calor utilizável. A partir do calor total produzido, a maior parcela de calor disponível é de gases de escape e do ciclo de resfriamento do motor, tendo que 1-3% e do ciclo de lubrificação (óleo lubrificante para motores) que tem temperaturas

de 80 - 90 °C, 3-5% são perdas na radiação, 30-40% é a energia para o resfriamento do motor (água de resfriamento) de temperaturas entre os intervalos 80 - 90 °C e, 50-60% é a energia dos gases de escape que podem sair a 460-550 °C.

O calor residual das usinas de biogás com temperaturas relativamente baixas e que variam desde 80-550 °C pode resultar na difícil conversão em outras formas de energia. No entanto, existem soluções técnicas para converter o calor residual em eletricidade adicional em ciclos termodinâmicos e, assim, obter receitas provenientes da venda de energia elétrica. Estes ciclos termodinâmicos podem ser [48]:

- Ciclo Rankine Convencional (Clausius Rankine Cycle “CRC”)
- Ciclo Rankine Orgânico (Organic Rankine Cycle “ORC”)
- Ciclo Kalina
- Ciclo Stirling
- Turbina de gás de escape

Geralmente, um ciclo termodinâmico é constituído por uma série de processos termodinâmicos da transferência de calor e de trabalho, enquanto se varia a pressão, temperatura, e outras variáveis de estado (vide Figura 3.16).

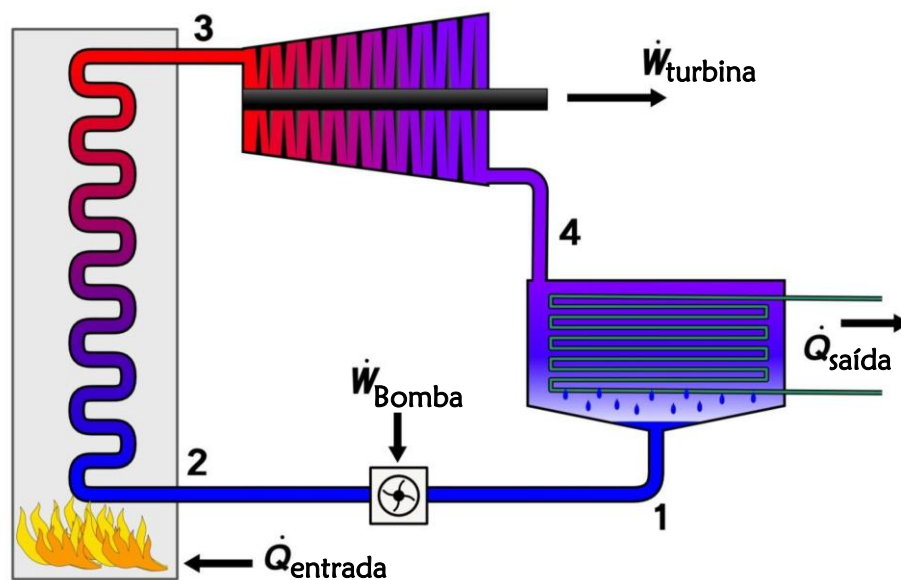


Figura 3.16 – Ciclo Rankine

Fonte: adaptado de [44]

### 3.4.1. Motores Gas-Otto

Os motores a gás-Otto (vide Figura 3.17) são motores especificamente concebido para a utilização de biogás de acordo com o princípio Otto. Eles são operados geralmente operado com excedentes elevados de ar, a fim de minimizar as emissões de monóxido de carbono [48]. A capacidade eléctrica de motores a gás-Otto está geralmente compreendida entre 100 kWe – 1 MWe e pode ser utilizado para produção de biogás com teores de metano a partir de 45%. Os intervalos de eficiência eléctrica se encontram entre 34 e 40% e o tempo de vida médio de motores a gás-Otto de tecnologia especial para usinas de biogás é de no mínimo 120 mil horas, com manutenção especial a cada 60 mil horas de funcionamento. Os motores são feitos para operarem 24 horas por dia, com paradas eventuais para troca de óleo [149]. O tempo de vida em geral, depende muito das características de operação e em intervalos de manutenção [44].

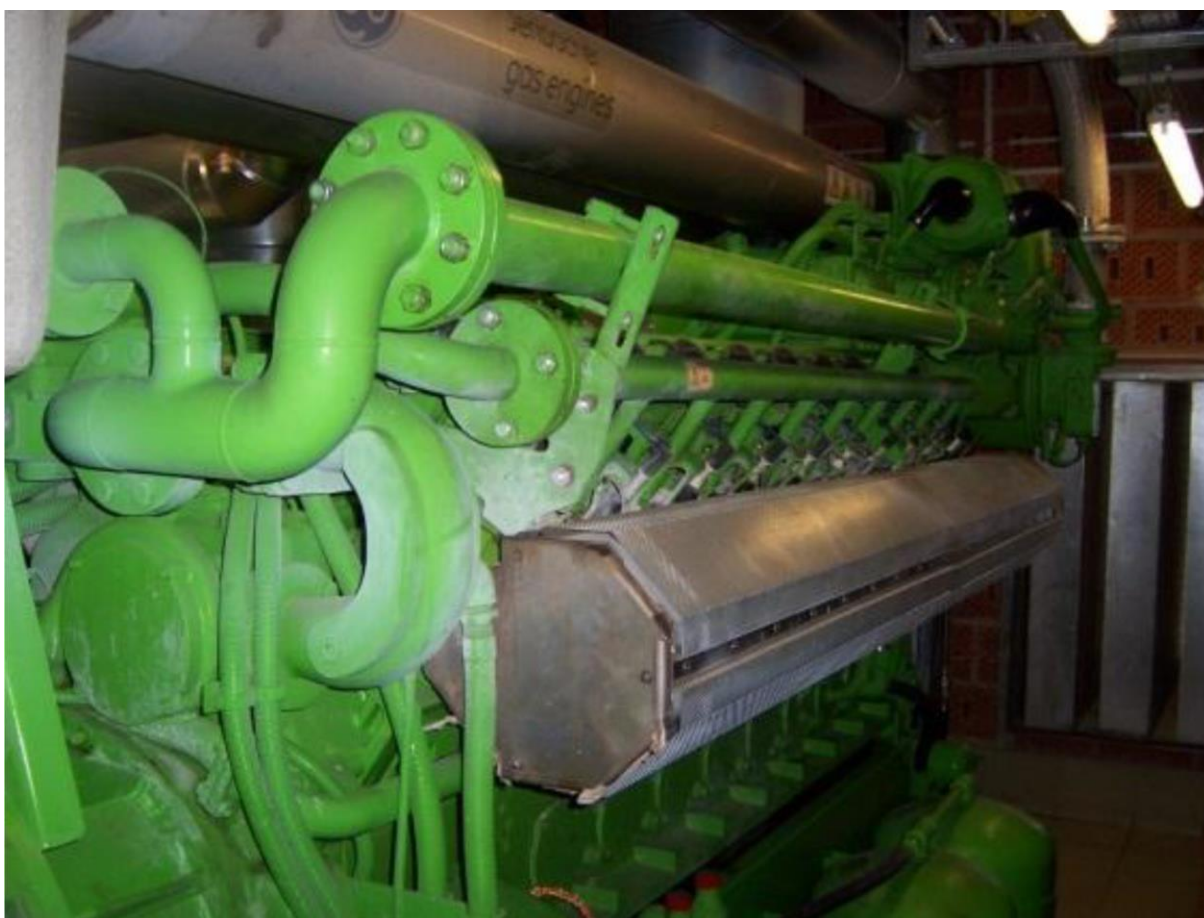


Figura 3.17 – Motor a gás-Otto de uma usina de biogás

Fonte: [48]

### 3.4.2. Motor de injeção

O motor de injeção (vide Figura 3.18) é baseado no princípio do motor diesel. Estes motores são usados frequentemente para tratores e veículos pesados. O biogás é misturado juntamente com o ar de combustão, passando esta mistura através de um sistema de injeção na câmara de combustão e onde é inflamado pela ignição de óleo injetado. Geralmente até 10% de óleo de ignição é automaticamente injetada e submetida a combustão. Estes motores são operados com excesso de ar.

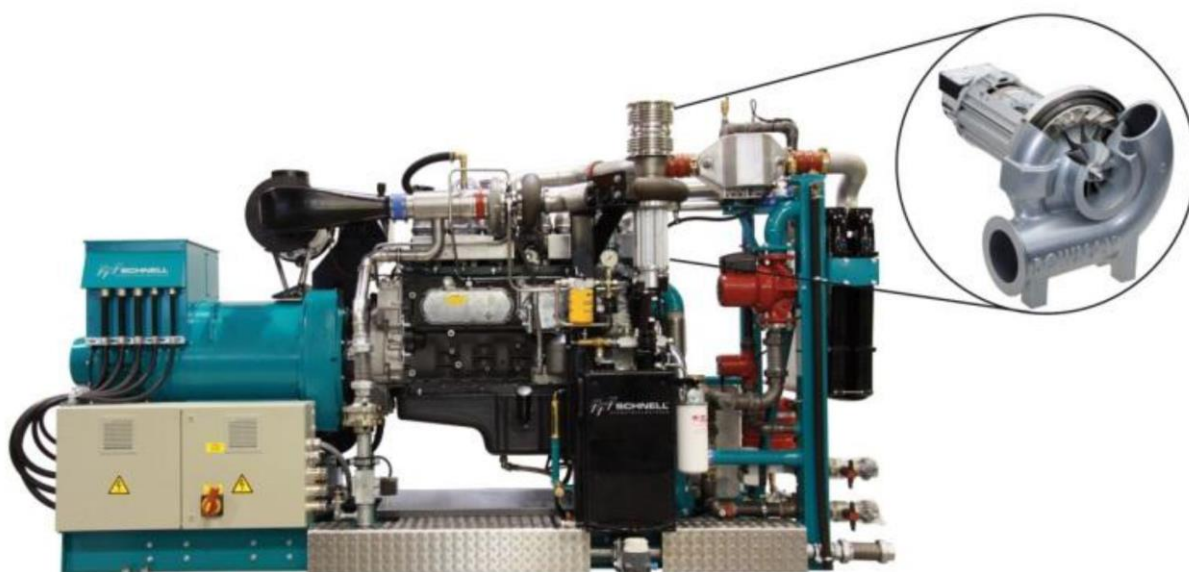


Figura 3.18 – Motor de injeção de duplo combustível de 235 kWe com uma turbina a gás de escape integrada de 30 kWe

Fonte: [44]

No caso do fornecimento de biogás interrompido, motores de injeção podem também operar com óleo diesel puro sem nenhum problema [48]. A substituição de biogás por óleo ou diesel pode ser necessário durante a fase de arranque da unidade de biogás para a produção de calor de processo. O óleo de ignição pode ser diesel fóssil ou óleo de aquecimento, mas também

podem ser utilizados biodiesel ou óleo vegetal da mesma maneira. A vantagem de óleos de ignição renováveis é que elas são livres de enxofre e emitem menos o monóxido de carbono. O uso típico de motores de injeção inclui capacidades de até 250 kWe instalado com intervalos de eficiências elétricas entre 30-40% e o tempo de vida médio cerca às 35.000 horas, após o qual o motor normalmente tem de ser substituído, sendo este geralmente mais barato do que uma revisão geral [44].

### **3.5. Mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL)**

Devido às mudanças climáticas existentes no planeta, surgiu o interesse de alguns países de procurar soluções concretas e sustentáveis para contrariar os impactos ambientais ocasionados por estas mudanças. No entanto, só foi a partir do protocolo de Kyoto assinado em 1998, onde 39 países se comprometeram na redução de suas emissões. Os governos signatários desses países concordaram em reduzir as emissões entre 2008 e 2012 em pelo menos 5% (em média), tendo como referência os níveis de emissões de 1990 [150]. Para isto, foram criados 3 mecanismos econômicos que permitam atingir suas metas. Estes mecanismos são a implementação conjunta (*Joint Implementation* II), que estabelece que os países que fazem parte do Anexo I<sup>14</sup> conduzam entre si, projetos para redução de emissões; Comércio de emissões (*Emission Trade*): restritos a empresas de países desenvolvidos, listados no Anexo I do Protocolo, no qual são permitidas a compra e venda do direito de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE); e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que permite a países não listados no Anexo I do Protocolo, a comercialização de créditos relativos a emissão de gases à países emissores que não atingem as metas de redução [151].

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL, ou *Clean Development Mechanism*, CDM, em inglês) teve origem na proposta brasileira de criação de um Fundo de Desenvolvimento Limpo, que seria formado por meio de recursos financeiros dos países

---

<sup>14</sup> Países Anexo I: Países assinantes do protocolo de Kyoto, os quais se comprometeram na redução de suas emissões até 2012 em pelo menos 5%, tendo como referência os níveis de emissões de 1990.

desenvolvidos que não cumprissem suas obrigações quantificadas de redução ou limitação de emissões de gases de efeito estufa (usualmente chamada de “metas”). Tal fundo seria utilizado para desenvolver projetos em países em desenvolvimento. Esse conceito não foi aceito por alguns países desenvolvidos e a ideia do fundo foi modificada, transformando-se no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo [132].

O mecanismo de desenvolvimento limpo consiste na possibilidade de um país que tenha compromisso de redução de emissões (país no Anexo I) adquirir Reduções Certificadas de Emissões (RCE), geradas por projetos implantados em países em desenvolvimento (países não-Anexo I), como forma de cumprir parte de suas obrigações quantificadas no âmbito do Protocolo. A ideia consiste em que um projeto gere, ao ser implantado, um benefício ambiental (redução de emissões de GEE ou remoção de CO<sub>2</sub>) na forma de um ativo financeiro, transacionável, denominado Reduções Certificadas de Emissões. Tais projetos devem implicar reduções de emissões adicionais àquelas que ocorreriam na ausência do projeto registrado como MDL, garantindo benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo para a mitigação da mudança global do clima, nos termos do Artigo 12 do Protocolo de Quioto [132,151].

A Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015 em sua 21ª sessão anual da Conferência das Partes (COP 21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (CQNUAC) e a 11ª sessão da Conferência das Partes enquanto Reunião das Partes no Protocolo de Quioto (CMP 11), realiza em Paris no ano 2015, resultou em um acordo global sobre o reforço na redução de emissões, assinando um acordo histórico, envolvendo a quase todos os países do mundo em um esforço para reduzir as emissões de carbono e conter os efeitos do aquecimento global [152]. O objetivo de longo prazo do acordo é manter o aquecimento global "muito abaixo de 2 °C".

O acordo de Paris destaca a urgência de acelerar a aplicação da Convenção Quadro e seu Protocolo de Kyoto, a fim de aumentar a ambição no período anterior a 2020, tendo uma ação reforçada no período anterior ao 2020 e insta a todas as Partes no Protocolo de Kyoto que ainda não tenham assinado, a que ratifiquem e apliquem a Emenda de Doha<sup>15</sup> ao Protocolo de Kyoto

---

<sup>15</sup> Extensão do Protocolo de Kyoto, estabelecendo um novo período de compromisso para reduzir as emissões de gases de efeito estufa até o 31 de dezembro de 2020.

[153]. Sendo assim, as atividades mais indicadas para projetos MDL, do protocolo de Kyoto, são entre outras, a substituição de óleo diesel ou carvão mineral em caldeiras por biomassa ou biodiesel, substituição do óleo diesel de geradores por biodiesel, reflorestamento, captação do gás metano de aterros sanitários ou fazendas de suínos e a substituição total ou parcial do óleo diesel pelo biodiesel em caminhões, ônibus, tratores, locomotivas, barcos e outras atividades previstas no MDL [34]. Os projetos devem envolver um ou mais dos gases de efeito estufa previstos no Anexo A<sup>16</sup> do Protocolo de Quioto, relacionados a diversos setores/fontes de atividades (vide Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Setores e fontes principais geradoras de gases de efeito estufa

| Setores/Atividades                 | Fontes  | Gases  |
|------------------------------------|---|--|
| Energia                            | Queima de combustíveis<br>Setor energético<br>Indústrias de transformação e de construção<br>Transporte<br>Outros setores<br>Emissões fugitivas de combustíveis<br>Combustíveis sólidos<br>Petróleo e gás natural<br>Outros | Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )<br>Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)<br>Metano (CH <sub>4</sub> )<br>Hexafluoreto de enxofre (SF <sub>6</sub> )   |
| Processos industriais              | Produtos minerais<br>Indústria química<br>Produção de metais<br>Outras produções<br>Produção de halocarbonos e hexafluoreto de enxofre<br>Consumo de halocarbonos e hexafluoreto de enxofre<br>Outros                       | Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )<br>Metano (CH <sub>4</sub> )<br>Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)<br>Hidrofluorcarbonos (HFCs)<br>Perfluorcarbonos (PFCs)<br>Hexafluoreto de enxofre (SF <sub>6</sub> ) |
| Uso de solventes e outros produtos | -   | Hidrofluorcarbonos (HFCs)<br>Perfluorcarbonos (PFCs)<br>Hexafluoreto de enxofre (SF <sub>6</sub> )<br>Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )<br>Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)                              |
| Agricultura                        | Fermentação entérica<br>Tratamento de dejetos<br>Cultivo de arroz<br>Solos agrícolas<br>Queimadas prescritas de savana<br>Queima de resíduos agrícolas<br>Outros  | Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )<br>Metano (CH <sub>4</sub> )<br>Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)   |
| Resíduos                           | Disposição de resíduos sólidos no solo<br>Tratamento de esgoto<br>Incineração de resíduos<br>Outros   | Metano (CH <sub>4</sub> )<br>Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )<br>Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)   |

<sup>16</sup> Anexo A: gases de efeito estufa que são causadores do aquecimento global

Fonte: [132]

### 3.6. Sistema de compensação de energia elétrica

O sistema de compensação de energia estabelecido pelas Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015 da ANEEL estabelecem as condições gerais para a conexão à rede da microgeração (potência instalada menor ou igual a 75 kWp) e minigeração (potência instalada entre 75 kWp e 5 MWp) distribuída no Brasil [154,155]. Este permite que sistemas fotovoltaicos e outras formas de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis com até 5 MWe de potências instaladas em residências, empresas, associações, possam realizar conexão à rede elétrica de forma simplificada, atendendo o consumo local e injetando o excedente na rede, gerando créditos de energia.

Além de outras modificações feitas pela resolução normativa 687/2015, se esta contemplando os empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras e a geração compartilhada.

**Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras:** caracterizado pela utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída, e desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento [155];

**Geração compartilhada:** caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada [155];

Com este tipo de sistema de compensação será factível que sistemas de produção de biogás em um local possam reduzir as contas de energia elétrica em outro local do mesmo proprietário que precise de energia elétrica, e, no caso de conformar-se em associações na modalidade de cooperativas ou consórcios podem negociar internamente o preço de energia. Neste caso o preço de energia elétrica pode ser similar ao preço de energia elétrica fornecida pelas distribuidoras, sem necessidade de leiloar a energia, a qual tem um preço menor que depende de cada leilão a realizar-se.

## **3.7. Digestão anaeróbia no Brasil e o mundo**

### **3.7.1. Digestão anaeróbia no mundo**

A China é um dos países líder na instalação de biodigestores, sendo a maioria deles biodigestores de uso doméstico. No ano 2007, a China tinha instalado 26,5 milhões de unidades de biogás com uma produção anual de 10,5 bilhões de m<sup>3</sup> (100 milhões de toneladas de carvão equivalente). Enquanto em 2015 estimou-se que o número total de famílias rurais que utilizaram biogás ascenderia a 60 milhões, com uma produção anual de biogás de aproximadamente 23,3 bilhões de m<sup>3</sup>. Os biodigestores na China são em sua maioria de tipo doméstico, instalados em um contexto de contribuir com a salubridade da população rural. No entanto o número de usinas agrícolas de biogás de grande porte tem crescido, e atualmente chegaram a 8.000 unidades com uma produção anual de biogás de 670 milhões de m<sup>3</sup> [99].

Nos países membros do *IEA Bioenergy Task 37*<sup>17</sup>, sendo a maioria países da União Europeia (EU), o contexto da digestão anaeróbia é outro, já que eles estão baseados em normas ambientais, como as normas promulgadas para assegurar o cumprimento dos objetivos climáticos e energéticos. Uma destas normas é a chamada 20-20-20, a qual define três objetivos

---

<sup>17</sup> Grupo de trabalho internacional que abrange a digestão anaeróbia (AD), é conformado por 13 países, entre eles Áustria, Brasil, Dinamarca, Finlândia, França, Irlanda, Noruega, Coreia do Sul, Suécia, Suíça, Holanda, Alemanha e Reino Unido+ Austrália que se incorporo no ano 2015.

principais; 20% de corte nas emissões de gases de efeito estufa (em relação aos níveis de 1990); 20% da energia da EU a partir de fontes renováveis e 20% na melhoria da eficiência energética. Estes objetivos foram propostos em setembro de 2007 e aprovados na legislação do 2009, sendo eles parte dos grandes objetivos da estratégia Europeia para um crescimento inteligente, sustentável e inclusivo ao 2020 [156]. Neste contexto a digestão anaeróbia cumpre grande importância no contexto europeu, sendo Alemanha um dos países que tem a maior produção de energia a partir deste processo, chegando a uma produção de 80 TWh anuais de energia, tendo o 65% da produção dos países membros do *IEA Bioenergy Task 37* (vide Figura 3.19).

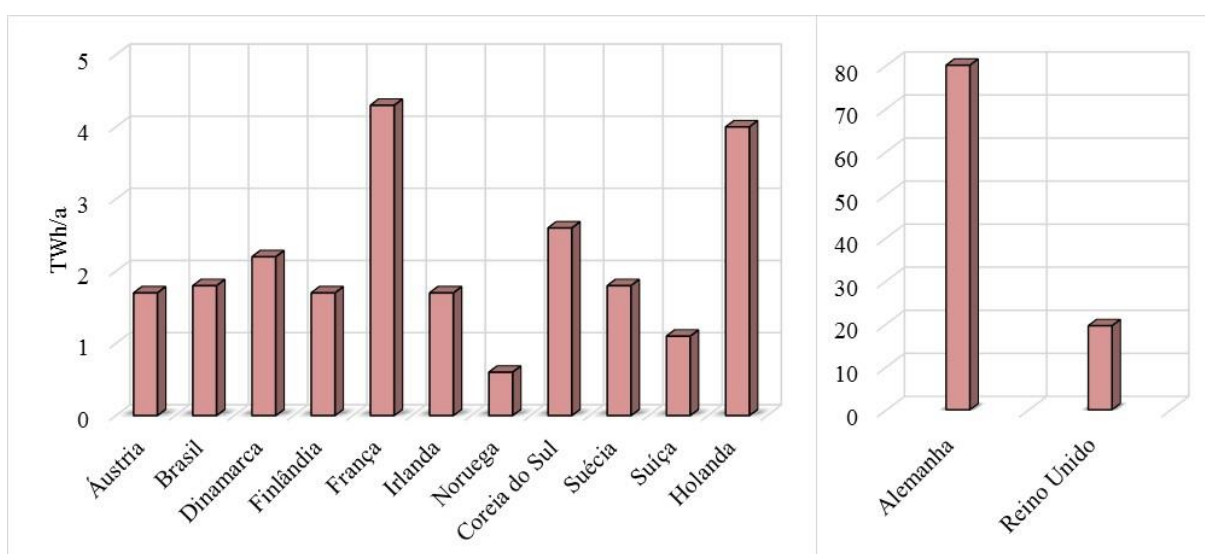


Figura 3.19 – Produção anual de energia partir de biogás em alguns países membro da *IEA Bioenergy Task 37*

Fonte: [156]

A Dinamarca também é um dos países onde a digestão anaeróbia com foco nos sistemas centralizados tem muita importância, tendo em sua maioria usinas de digestão conjunta “joint digestion” integrando sistemas de recolhimento de culturas energéticas, fração dos resíduos orgânicos, e tratamento sanitário dos dejetos [157]. A maioria das usinas de biogás na Dinamarca se encontram na parte ocidental, sendo que é nesta zona onde se encontra também a maior parte da produção pecuária.

Na maioria dos países da União Europeia existe subsídios para a instalação de usinas de digestão anaeróbia, estes subsídios são do 30% do investimento inicial [52,158,159], com

limitações em alguns casos até 200 mil USD. Além disso, há receitas extras pela venda de calor residual. Além da energia que eles vendem, a maioria destes países tem algum tipo de subsídio, tal como no caso da Itália que recebe um subsídio extra de 50,13 USD/MWh [160], Suécia que também recebe 22,79 USD/MWh [158], Holanda com subsídios de 110,52 USD/MWh por 10 anos iniciado o projeto [161], ou Turquia com subsídios de 113,94 USD/MWh [162]. É comum que os sistemas de digestão anaeróbia se encontrem integrados à utilização de digestato ou de fertilizante sólido, no caso da Holanda, estes exportam o digestato para os países da União Europeia [161].

### **3.7.2. Digestão anaeróbia no Brasil**

Nos anos 80, no Brasil, existiam cerca de 3.000 biodigestores em operação [15]. Estes biodigestores foram instalados no contexto da falta de energia elétrica nas instalações rurais, nos quais a energização da propriedade rural foi o sonho de muitos agricultores e pecuaristas brasileiros, os quais tinham o interesse de gerar sua própria energia, pois muitos deles se encontravam distantes das linhas de conexão elétrica e outros pelo elevado custo de investimento para a conexão à rede elétrica [163]. No Brasil, o primeiro biodigestor modelo chinês foi instalado pela EMBRATER, em novembro de 1979, na granja do Torto, Brasília - DF [42]. Foi nessa mesma década que se desenvolveram diferentes iniciativas com a finalidade de consolidar a tecnologia de digestão anaeróbia, tendo que Brasil alcançou no 1986 o terceiro lugar no mundo em quantidade de biodigestores instalados, com 7.500 unidades, sendo somente ultrapassado pela China e pela Índia [15].

Foi a partir dos 90 que viu-se a possibilidade de utilizar os biodigestores não somente para transformação da biomassa em biogás, mas também para a utilização de biogás para geração de energia elétrica, sendo nessa mesma década que se começava a falar sobre efeito estufa e aquecimento global [29].

Somente depois do ano 2.000 o biogás começou a tomar importância, primeiro pelo protocolo de Kyoto, e posteriormente pelo início do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), criado no setor do Ministério de Minas e Energia (MME), conforme a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002 e revisado pela Lei nº 10.762, de 11

de novembro de 2003 [34,164]. O objetivo do programa conforme ao descrito no Decreto nº 5.025, de 2004, consistia em aumentar a participação de energias alternativas na geração de energia elétrica para o Sistema Interligado Nacional (SIN), as quais incluíam fontes eólicas, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH).

Nesse contexto, o projeto Itaipu Binacional fomentou a inserção da energia gerada por uma usina de biogás na rede de energia elétrica, sendo a Granja Colombari, localizada em São Miguel do Iguçu-PR, a primeira que forneceu energia elétrica para o SIN. A granja dispõe de três mil cabeças de suínos e produz diariamente 360 kWe de energia elétrica, sendo 60% consumidos na propriedade e os 40% restantes vendidos à Companhia Paranaense de Energia (COPEL) [29].

Na atualidade, o Brasil tem 149 usinas de biogás espalhadas pela maioria dos estados. Estas usinas produzem um total 2.214.831 m<sup>3</sup>/dia de biogás. Paraná é um dos estados que tem a maior quantidade de usinas de biogás, somando até o momento 45 unidades de biogás com uma produção total 258.000 m<sup>3</sup>/dia. São Paulo, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, Santa Catarina e Rio de Janeiro são os outros estados que têm a maior quantidade de usinas instaladas e a maior produção de biogás (vide Figura 3.20 e Figura 3.21).

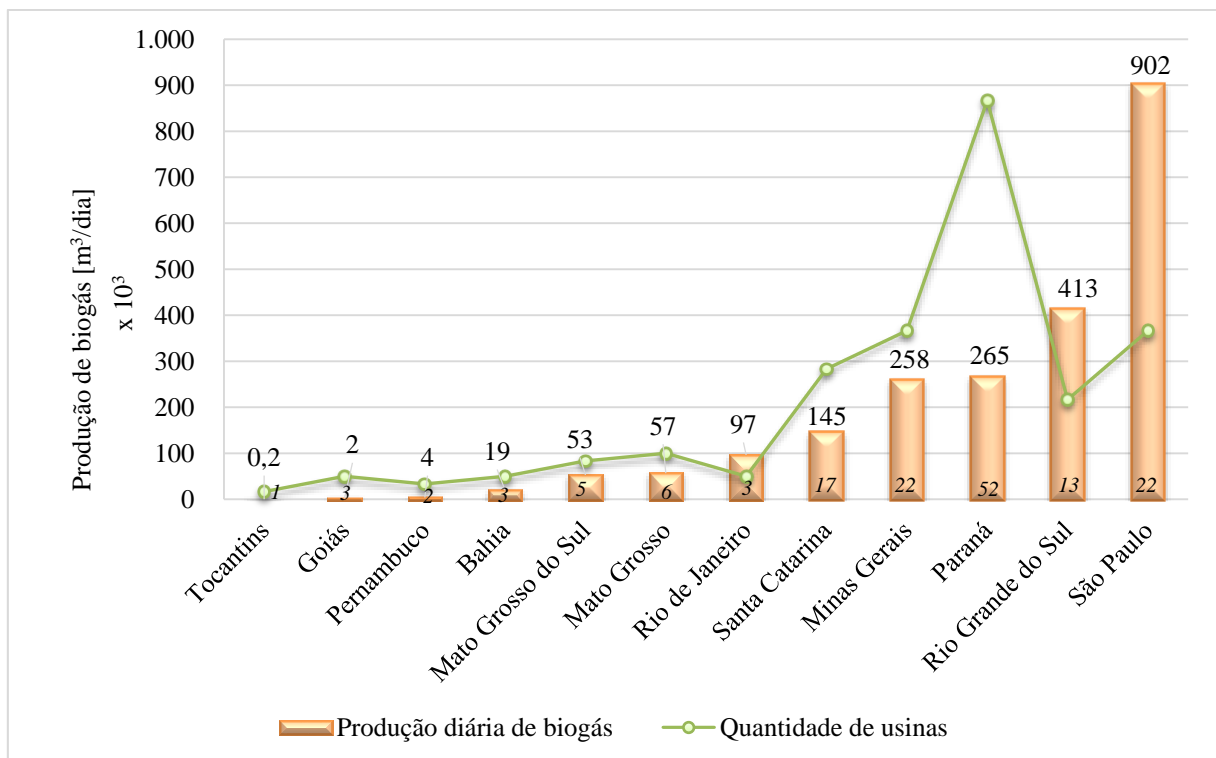


Figura 3.20 – Usinas de biogás no Brasil nos diferentes estados: produção de biogás x quantidade de usinas

Fonte: adaptado de [165]

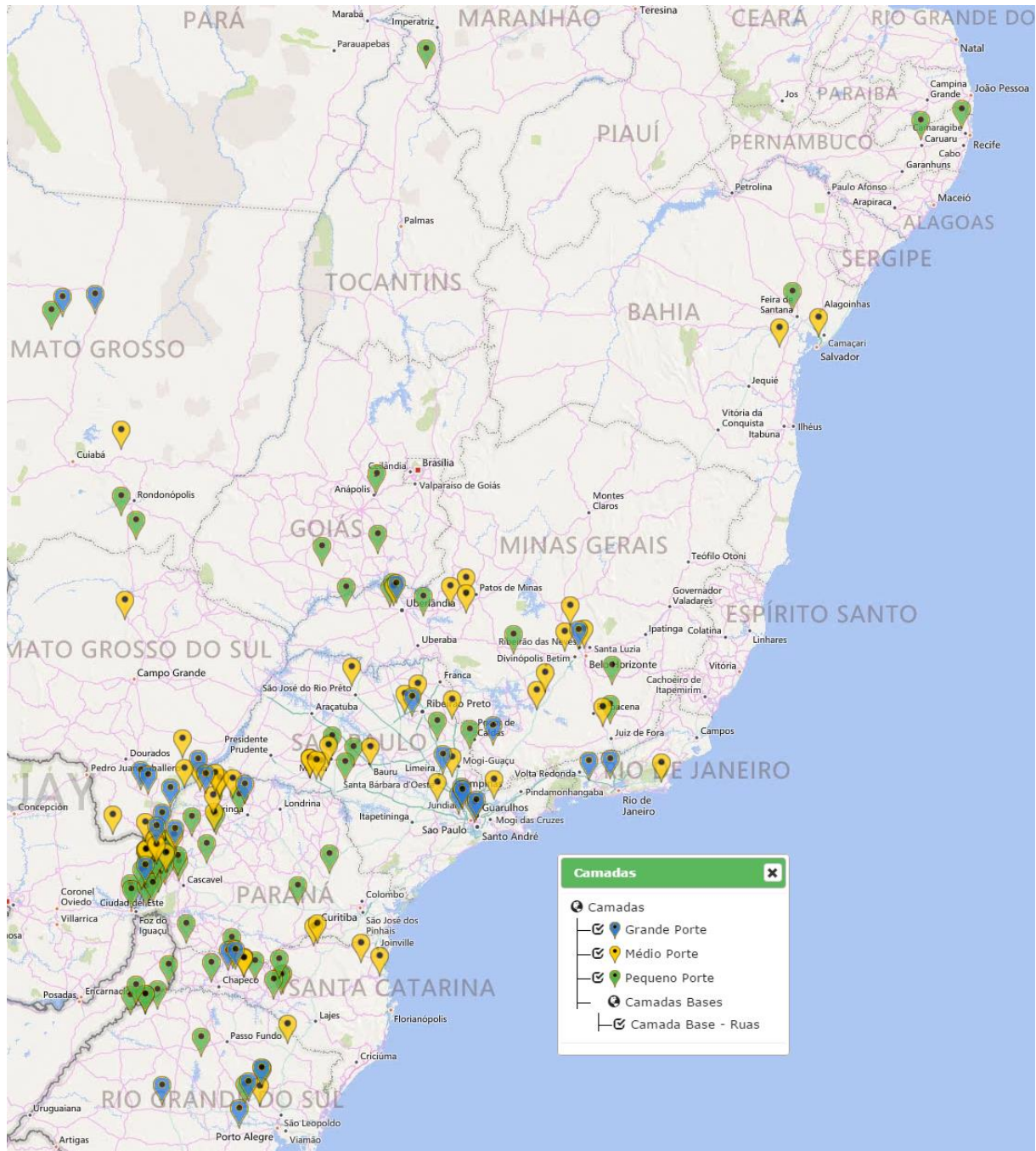


Figura 3.21 – Mapa de localização das usinas de biogás instaladas no Brasil

Fonte: [165]

As usinas instaladas no Brasil majoritariamente produzem biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos, que corresponde a 58% de toda a produção de biogás (vide Tabela 3.5). Além disso, a produção de biogás a partir de dejetos animais representa uma produção de 12,01%, da qual a maior produção é pela utilização de dejetos suínos, sendo o estado do Santa Catarina quem tem a maior produção de biogás, chegando a valores de 125.191 m<sup>3</sup>/dia de biogás, o qual representa 48,41% da produção de biogás a partir de dejetos suínos e 47,08% da produção de biogás a partir de dejetos animais (não inclui indústria de alimentos e/ou bebidas).

A co-digestão no Brasil atualmente só representa o 6,07% da produção de biogás, sendo está em sua totalidade realizada a partir da co-digestão de resíduos, no entanto, não se tem certeza do qual resíduo está-se utilizando para fazer a co-digestão, podendo ser estes de origem agropecuário, resíduos de abatedouros, ou até resíduos sólidos orgânicos. Além disso, que não se tem certeza do tipo de tecnologia utilizada para a biodigestão, pelo que possível que a maioria dos biodigestores ainda sejam do tipo canadense de laguna coberta com geomembrana. Embora na atualidade já exista usinas de co-digestão, a co-digestão de Culturas Energéticas Dedicadas ainda não é considerada dentro do esquema de produção de biogás, sendo que a tendência na utilização destes substratos seguira tomando força nos próximos anos [25].

Tabela 3.5 – Produção de biogás no Brasil por categoria e fonte de substrato

| Categoria/fonte de substrato           | Produção média de biogás<br>[m <sup>3</sup> /dia] | Porcentagem<br>[%] |
|--|---|--------------------|
| <b>Estação de Tratamento de Esgoto</b> | <b>90.646</b>                                     | <b>4,09%</b>       |
| Esgoto                                 | 6.416   | 0,29%              |
| Lodo de esgoto                         | 84.230  | 3,80%              |
| <b>Co-digestão</b>                     | <b>134.445</b>                                    | <b>6,07%</b>       |
| Co-digestão de resíduos                | 134.445   | 6,07%              |
| <b>Agropecuária</b>                    | <b>273.050</b>                                    | <b>12,33%</b>      |
| Avicultura de postura ou corte         | 1.150   | 0,05%              |
| Bovinocultura de leite ou corte        | 6.168   | 0,28%              |
| Indústria de alimentos e/ou bebidas    | 7.138   | 0,32%              |
| Suinocultura                           | 258.594   | 11,68%             |
| <b>Indústria</b>                       | <b>424.686</b>                                    | <b>19,17%</b>      |
| Indústria de laticínios                | 1.000   | 0,05%              |
| Abatedouro de aves ou suínos           | 11.500  | 0,52%              |
| Indústria suco energética              | 74.960  | 3,38%              |
| Indústria de alimentos e/ou bebidas    | 337.226   | 15,23%             |
| <b>Aterro Sanitário</b>                | <b>1.292.004</b>                                  | <b>58,33%</b>      |

|                    |                  |                |
|--------------------|------------------|----------------|
| Aterro sanitário   | 1.292.004        | 58,33%         |
| <b>Total Geral</b> | <b>2.214.831</b> | <b>100,00%</b> |

Fonte: adaptado de [165]

Finalmente, na Tabela 3.6 é mostrado um resumo de alguns projetos e avaliações econômicas feitas no Brasil e alguns países europeus, com a finalidade de uma melhor compreensão da digestão anaeróbia centralizada e descentralizada, comparando algumas características comuns como volume do reator e potências instaladas, além disso, também se pode observar o valor do investimento dos projetos e os subsídios no caso dos países europeus.

### **3.8. Considerações finais do capítulo**

A partir do descrito neste capítulo, foi possível conhecer alguns aspectos técnicos dos processos da digestão anaeróbia, sendo que existem muitos tipos de tecnologias e cada uma delas precisa de características especiais no que se refere ao tipo substratos, temperatura do processo ou etapas envolvidas, sendo o tipo de biodigestor utilizado quase como tecnologia padrão, o reator de mistura completa (CSTR).

Embora existam diversos substratos para digestão anaeróbia, as silagens de milho e de capim elefante podem ser uma boa opção para co-digestão nas usinas de biogás no Brasil, tendo em consideração que o milho é um cultivo amplamente espalhado no mundo inteiro e a silagem de capim é uma das culturas energéticas promissórias no Brasil, sendo utilizado atualmente nas usinas de queima para geração de energia.

Tabela 3.6 – Resumo de alguns projetos e avaliações econômicas feitas no Brasil e alguns países europeus

| Sistema  | Substratos   | Potência[kWe]<br>Volume de reator [m <sup>3</sup> ] | Energia contida no biogás [kWe/ton] | Temp TRH % substrato          | Custo de transporte              | Distância de transporte [km]                                      | Investimento [USD]                | Preço de venda de energia [USD/MWh] | Ref.  |
|--|--|---|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---|-----------------------------------|-------------------------------------|-------|
| Centralizado (Nysted)<br>Co-digestão Dinamarca             | Dejetos + biomassa dedicada  | 780 <sup>18</sup> /5.000                            | 96,11                               | 38°C<br>24 dias<br>85:15:00   | -                                | 7   | 6.700.000                         | -                                   | [157] |
| Centralizado (Lemvig)<br>Co-digestão Dinamarca             | Dejetos + biomassa dedicada  | 1.620 <sup>18</sup> /7.600                          | 89                                  | 52,5°C<br>18 dias<br>83:17:00 | -                                | 7,5   | 8.500.000                         | -                                   | [157] |
| Centralizado (Vester Hjermitslev)<br>Co-digestão Dinamarca | Dejetos + biomassa dedicada  | 300 <sup>18</sup> /1.500                            | 133,33                              | 37°C<br>28 dias<br>75:25:00   | -                                | 1,5   | 1.900.000                         | -                                   | [157] |
| Descentralizado<br>Mono-digestão<br>Áustria <sup>19</sup>  | Silagem de milho   | 100/ND<br>250/ND<br>500/ND                          | 900                                 | -                             | 0,48 USD/km                      | 0,8<br>1,2<br>1,7   | 514.455<br>1.112.629<br>2.109.585 | 188<br>165<br>142                   | [52]  |
| Centralizado<br>Mono-digestão<br>Itália <sup>20</sup>      | Milho/Silagem/s abugo  | 999/2.750   | -                                   | -                             | -                                | <3 km, PTI e SPI; 3-14 km, SSA; 14-30, SPI; >32 SSA <sup>21</sup> | -                                 | 268,89                              | [160] |
| Centralizado<br>Co-digestão<br>Itália                      | Esterco de bovino + Silagem de Cana-do-reino ( <i>Arundo donax</i> ) | 100-999/ND  | -                                   | ND<br>ND<br>0-100             | 1,14 USD/km + 51,27 USD (20 ton) | 10  | 4.557.516                         | -                                   | [166] |
| Centralizado<br>Co-digestão<br>Itália                      | Esterco bovino + Cana-do-reino                                       | 100-999/ND  | -                                   | ND<br>ND<br>0-100             | 1,14 USD/km + 51,27 USD (20 ton) | 10  | 4.557.516                         | -                                   | [167] |
| Centralizado<br>Mono-digestão<br>Suécia <sup>22</sup>      | Esterco bovino   | 35-225/500  | 140                                 | Mesofílico<br>18 dias         | 1,71 USD/ton                     | -   | 341.814<br>1.481.193              | 80                                  | [158] |

<sup>18</sup> Calculado a partir da quantidade de biogás produzida para 8.000 horas/ano e uma eficiência elétrica de 40%, para o ano 2015 Lemvig teve 2.625 kWe instalado [109]

<sup>19</sup> Subsídio: 30% do investimento (2008)

<sup>20</sup> Subsídio: 50,13 USD/MWh (2015)

<sup>21</sup> PTI: Planta Inteira; SPI: Silagem de Planta Inteira; SSA: Silagem de Sabugo

<sup>22</sup> Subsídio: 30% do investimento, máximo 227.876; USD; 22,79 USD/MWh por tratamento de esterco; 5,70 USD/MWh por conexão à rede de baixa tensão (2012)

| Sistema   | Substratos  | Potência[kWe]<br>Volume de reator [m <sup>3</sup> ] | Energia contida no biogás [kWh/ton] | Temp TRH % substrato                | Custo de transporte  | Distância de transporte [km]  | Investimento [USD]   | Preço de venda de energia [USD/MWh]  | Ref.  |
|---|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--|---|----------------------|--|-------|
| Centralizado Mono-digestão Suécia <sup>22</sup>   | Esterco bovino  | 40-290/2.900  | 140                                 | Termofílico 25 dias                 | -  | -   | 341.814<br>1.481.193 | 80   | [158] |
| Centralizado Co-digestão Holanda <sup>23</sup>    | Suíno + milho + resíduos de alimentos + aves + bolbos de flores | ND/1.800  | -                                   | Mesofílica 40°C 40 dias 73:11:5:9:2 | 2,85 USD/ton (suínos)<br>43,30 USD/ton (milho)<br>45,58 USD/ton (alimentícios) | 15-25   | -                    | 68,36 + exportação de digestato à UE   | [161] |
| Centralizado Co-digestão Grécia <sup>24</sup>     | Estrume de porco fresco + palha de trigo + glicerol             | 816/ND  | 881                                 | Termofílica ND 33:22:44             | -  | -   | 9.950.375            | 91,31  | [159] |
| Descentralizado Co-digestão Turquia <sup>25</sup> | Esterco bovino + esterco de ovelha                              | 289/2.713   | 81,36                               | Mesofílica 40°C 33 dias             | 6,63 USD/ton   | 18 km esterco bovino; 70 km esterco de ovelha; 107 km beterraba; 126 km milho | 11.692.433           | 113,94   | [162] |
| Descentralizado Mono digestão Brasil              | Esterco suíno   | ND/300  | 94,95                               | Psicrofílica (20,8 °C) 40 dias      | -  | -   | 10.896               | 6.859 USD/ano por venda de botijões de biogás + 5.125 USD/ano por venda de digestato | [105] |
| Descentralizado Mono-digestão Brasil              | Vinhaça   | 5.413/ND  | -                                   | -                                   | -  | -   | 1.377.035            | 48,14  | [34]  |
| Descentralizado Mono-digestão Brasil              | Suíno   | 100/3.803   | 23,31                               | Mesofílica 35-40°C 20 dias          | -  | -   | 3.326.630            | 75,45 + 30,18 USD/ton de digestato   | [149] |
| Descentralizado Mono-digestão Brasil              | Suíno   | 143/1.970   | 5,64                                | -                                   | -  | -   | 369.943              | -  | [168] |

<sup>23</sup> Subsídio: 110,52 USD/MWh até geração de 2 MW por 10 anos (2009)

<sup>24</sup> Subsídio: 30% do investimento (2009)

<sup>25</sup> Subsídio: 113,94 USD/MWh por 10 anos (2012)

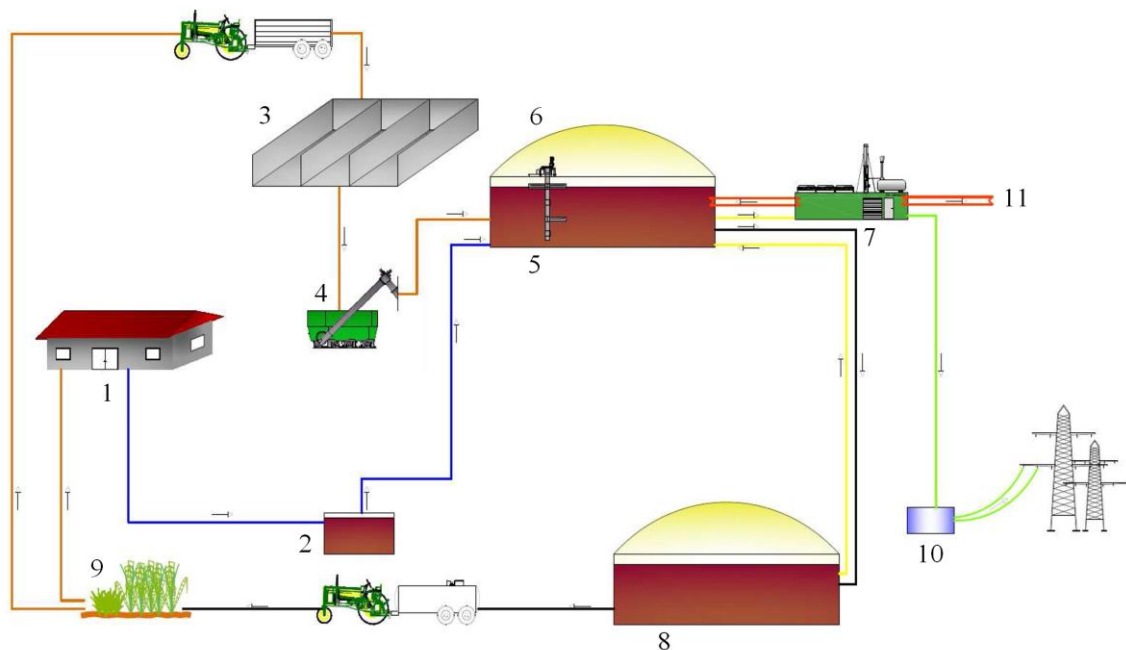
## Capítulo 4.

### **METODOLOGIA**

Este trabalho se propõe a efetuar uma análise dos sistemas de produção de biogás centralizado e descentralizado no contexto brasileiro, considerando a utilização de misturas ou co-digestão de substratos que permitam o incremento da produção de biogás, com a finalidade de gerar energia elétrica. A metodologia proposta neste trabalho se divide em três partes; i) O modelo de avaliação técnica, onde se faz uma avaliação dos parâmetros principais que podem limitar e definir os sistemas de produção de biogás centralizado e descentralizado, além disso, se faz um balanço de matéria e energia, com a finalidade de especificar e dimensionar os sistemas; ii) Definição e descrição de cenários, onde se faz a seleção dos cenários propostos para realizar a análise econômica baseados em resultados da avaliação técnica; iii) O modelo de análise econômica, onde se descrevem os critérios econômicos a serem analisados, visando a ter um conhecimento do impacto econômico do transporte de substratos no caso dos sistemas centralizados, além de realizar uma análise de sensibilidade das principais variáveis.

## 4.1. Modelo de avaliação técnica

Para realizar a avaliação técnica foram considerados os processos de digestão anaeróbia em fluxo contínuo em uma etapa e digestão úmida, a qual considera que o conteúdo de sólidos no biodigestor não seja maior ao 12%, pois o teor de umidade permite o bombeamento do conteúdo do biodigestor [27,48,71]. Nesse sentido, a Figura 4.1 descreve o processo de digestão anaeróbia proposto, o qual tem em conta a digestão anaeróbia de esterco de gado bovino como substrato principal e, silagem de milho e silagem de capim elefante (*Pennisetum purpureum*) como co-substratos.



- 1 Estábulos
- 2 Tanques de coleta de esterco
- 3 Armazenagem de matéria-prima sólida (co-substrato)
- 4 Sistema de alimentação de matéria-prima sólida (co-substrato)
- 5 Biodigestor (reator anaeróbico com produção de biogás)
- 6 Armazenamento de biogás
- 7 Unidade de geração de energia e calor (CHP)
- 8 Armazenamento de digestato
- 9 Culturas agrícolas
- 10 Transformador/Energia à rede elétrica
- 11 Utilização de calor

Figura 4.1 – Planta de biogás agrícola utilizando co-digestão de esterco e CED

Fonte: adaptado de [48]

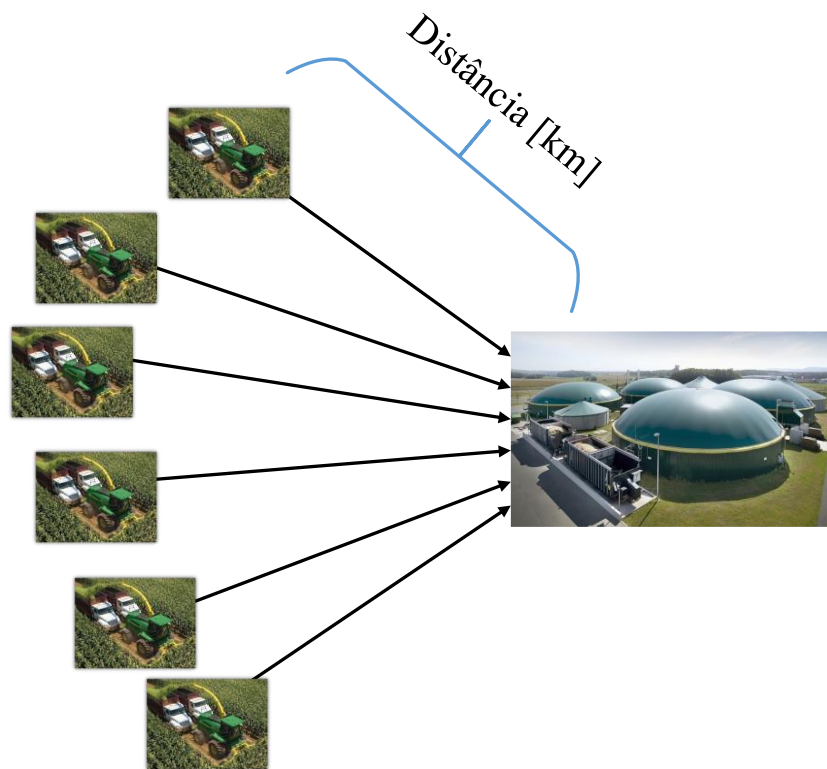


Figura 4.2 – Sistema de digestão anaeróbia centralizada



Figura 4.3 – Sistema de digestão anaeróbia descentralizada

O substrato principal utilizado para realizar a avaliação técnica é o esterco de gado bovino criado intensivamente (corte ou leite). Estes animais ao permanecerem confinados durante a maior parte do tempo, facilitam o processo consistente na coleta e tratamento dos dejetos [25]. Enquanto os co-substratos, são a silagem de milho e a silagem de capim elefante, considerados como culturas energéticas dedicada (CED) por serem produzidas exclusivamente para o processo de digestão anaeróbia [166,167]. Além disso, estas culturas energéticas dedicadas são as mais utilizadas hoje em dia para a produção de biogás [169].

Os sistemas de digestão anaeróbia considerados são a digestão anaeróbia centralizada e a digestão anaeróbia descentralizada (vide Figura 4.2 e Figura 4.3), as quais tem particularidades principalmente, pela utilização de utilização de co-substratos (sistemas centralizados) e mono-substratos (sistemas descentralizados). Os co-substratos em geral, são produzidos em lugares distantes das fazendas nas quais se tem instalado o biodigestor.

Na *digestão anaeróbia centralizada* considera-se sistemas de co-digestão, tendo os sistemas de co-digestão de esterco de bovino misturado com silagem de milho, a qual será chamada co-digestão centralizada “bovino-milho” e sistemas de co-digestão esterco de bovino misturado com silagem de capim, a qual será chamada co-digestão centralizada “bovino-capim”. Espera-se ver que os co-substratos utilizados tenham influência direta na produção do biogás pela sua alta produção específica de biogás gerado em comparação com o esterco de gado bovino, o qual será o substrato base. Neste tipo de digestão, considera-se as distâncias relativas para o transporte de co-substratos de silagem de milho e silagem de capim, já que é considerado que eles se produzem em lugares distantes da usina de biogás.

Na *digestão anaeróbia descentralizada* são consideradas a utilização de esterco de gado bovino como mono-substrato, a qual será chamada de mono-digestão descentralizada “bovino”; além disso, também serão considerados sistemas de co-digestão de esterco de bovino misturado com silagem de milho, a qual será chamada de co-digestão descentralizada “bovino-milho” e sistemas de co-digestão esterco de bovino misturado com silagem de capim, a qual será chamada de co-digestão descentralizada “bovino-capim”. Neste tipo de digestão descentralizada, as distâncias relativas de transporte são desprezadas, tendo em consideração que as culturas de milho e capim idealmente encontram-se nos arredores da fazenda onde tem-se instalado o biodigestor. No entanto dependendo da área cultivada é possível ter uma distância

relativa para estes sistemas que serão abordados mais adiante. Todas as percentagens de mistura são em função das silagens, tanto de milho como de capim.

#### 4.1.1. Requerimento de biogás e produção de energia elétrica

Para a determinação da produção de energia elétrica e requerimentos de biogás, levou-se em consideração os tamanhos das usinas de biogás a avaliar, compreendendo desde usinas pequenas, médias e grandes, nos intervalos que vão desde 100 kWe até 1.000 kWe de potência elétrica instalada. Para a definição dos tamanhos das usinas levou-se em conta a classificação da usinas de biogás feitas por Poeschl et al e Pullem et al [92,93,94].

Para determinar as eficiências elétricas e térmicas das usinas de biogás utilizou-se um ajuste dos valores das diferentes eficiências elétricas e térmicas dos sistemas combinados de calor e energia elétrica “Combined Heat and Power (CPH)” para diferentes potências. Estes foram obtidos a partir de dados fornecidos pelos fabricantes destes sistemas. Os motores utilizados para a geração de energia são motores de combustão interna tipo Otto-gás.

A produção de biogás e do teor de metano está diretamente relacionada com o tamanho das usinas de biogás e foi calculada tendo em consideração características padrão de teor de metano no biogás da digestão anaeróbia, poder calorífico inferior do biogás e tempo de operação da usina de biogás (vide Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados para a avaliação da produção do biogás

| Parâmetros                          | Unidade             | Valor | Referência |
|-------------------------------------|---------------------|-------|------------|
| Percentagem de metano no biogás     | %                   | 65,0  | [47]       |
| Poder calorífico inferior do biogás | kWh/Nm <sup>3</sup> | 6,5   | [47]       |
| Tempo de operação do moto gerador   | h/a                 | 8.000 | [44,158]   |
| Poder calorífico inferior do metano | MJ/Nm <sup>3</sup>  | 35,53 | [170]      |
| Volume específico do metano         | kg/m <sup>3</sup>   | 0,67  | [170]      |

Fonte: adaptado de [47,44,158,170]

### 4.1.2. Quantidade dos substratos a utilizar

Para determinar a quantidade de substratos e co-substratos (em percentagem mássica) a utilizar, é indispensável primeiro fazer uma avaliação da quantidade máxima admissível no biodigestor para que este possa fazer uma boa digestão; para isto, é necessário determinar o balanço da relação carbono/nitrogênio, a qual é fundamental para a produção ótima do biogás. Para o cálculo da relação de C:N foi utilizada a equação 4.1 que faz o cálculo da relação C:N de misturas, tendo em consideração as quantidades de carbono e nitrogênio de cada matéria-prima.

$$K = \frac{C1 \times Q1 + C2 \times Q2 + \dots Cn \times Qn}{N1 \times Q1 + N2 \times Q2 + \dots Nn \times Qn} \quad (4.1)$$

Onde:

$K$  = C:N da mistura de matérias-primas (substratos);

$C_i$  = Percentagem de carbono orgânico contido em cada matéria-prima [%];

$N_i$  = Percentagem de nitrogênio orgânico contido em cada matéria-prima [%];

$Q_i$  = Peso fresco de cada matéria [kg]

Para determinar o rendimento de biogás por tonelada de mistura considerou-se os rendimentos médios do esterco bovino e dos co-substratos utilizados, os quais são obtidos a partir das quantidades de sólidos totais, sólidos voláteis e o rendimento específico de biogás dos substratos avaliados (vide Tabela 4.2). Além disso, levou-se em consideração a percentagem de substratos e co-substratos a utilizar, o qual foi definido pela relação de C:N ótima da mistura. Os rendimentos de biogás por tonelada da mistura dos substratos podem ser calculados por meio da equação 4.2, tendo em consideração somente a percentagem de substrato e co-substrato a utilizar e seu rendimento de biogás respectivo. Este é avaliado tendo em consideração a quantidade de co-substrato a qual depende dos limites mínimos e máximos da relação C:N determinada anteriormente.

Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados para a avaliação da produção do biogás

| Parâmetros                      | Unidade               | Esterco do gado bovino | Ref.  | Silagem de milho | Ref.  | Silagem de capim | Ref.         |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------|-------|------------------|-------|------------------|--------------|
| Sólidos totais                  | %                     | 20,1                   | [74]  | 33,5             | [74]  | 36,6             | [171]        |
| Sólidos voláteis                | %                     | 80                     | [71]  | 95,5             | [71]  | 91               | [114]        |
| Relação C:N                     | C:N                   | 15,44                  | [130] | 40,5             | [74]  | 43,6             | [114]        |
| Nitrogênio, média               | %                     | 0,30-2,00              | [76]  | 0,77-1,11        | [27]  | 0,58-1,40        | [68]         |
| Rendimento específico de biogás | m <sup>3</sup> /kg SV | 0,28                   | [42]  | 0,60             | [71]  | 0,65             | [71]         |
| Rendimento de biogás            | m <sup>3</sup> /ton   | 45,0                   | [48]  | 198,0            | [52]  | 216,6            | [71,114,171] |
| Matéria gerada por gado ao dia  | kg/u.dia              | 21                     | [172] | -                | -     | -                | -            |
| Rendimento por hectare          | ton/ha.a              | -                      | -     | 40               | [173] | 38               | [171]        |

Fonte: adaptado de [27,42,48,52,68,71,74,76,114,130,172,171,173]

$$R_T = x_1 \times R_1 + x_2 \times R_2 + \dots x_n \times R_n \quad (4.2)$$

Onde:

$R_T$  = Rendimento de biogás da mistura [m<sup>3</sup>biogás/ton<sub>mistura</sub>];

$R_1$  = Rendimento de biogás do substrato ou co-substrato 1 [m<sup>3</sup>biogás/ton];

$R_2$  = Rendimento de biogás do substrato ou co-substrato 2 [m<sup>3</sup>biogás/ton];

$R_n$  = Rendimento de biogás do substrato ou co-substrato n [m<sup>3</sup>biogás/ton];

$x_1$  = Fração em massa do substrato ou co-substrato 1;

$x_2$  = Fração em massa do substrato ou co-substrato 2;

$x_n$  = Fração em massa do substrato ou co-substrato n

Para determinar a área (hectares) que serão necessárias para gerar as potências elétricas estabelecidas levou-se em conta valores médios do rendimento por área (hectares) dos co-substratos utilizados na produção de biogás (vide Tabela 4.2); e para determinar a quantidade de unidades geradoras (gado) teve-se em conta a quantidade máxima de geração de esterco por unidade geradora (gado bovino) de um gado adulto de 300 kg de peso [172].

### 4.1.3. Dimensionamento dos biodigestores

O tempo de retenção hidráulico (TRH) é um dos principais parâmetros de operação e depende diretamente da temperatura de operação da usina a biogás. Considera-se a operação da usina de biogás em condições mesofílicas de 38°C, logo é necessário o aquecimento do biodigestor. O tempo de retenção hidráulico do biodigestor é calculado pela equação 4.3, a qual foi estimada a partir de dados experimentais de usinas de biogás em diferentes condições de temperatura e TRH [174].

$$TRH = -51,227Ln(T) + 206,72 \quad (4.3)$$

Onde:

TRH = Tempo de retenção hidráulico [dias];

T= Temperatura [°C]

O tamanho dos biodigestores depende principalmente, do tipo de substrato, da quantidade de substrato disponível por dia e o tempo de retenção hidráulico. Para fazer o dimensionamento dos biodigestores e de seus componentes, tais como tanque de preparação de esterco, sistema de armazenamento de silagem (silo), gasômetro para o armazenamento de biogás e tanque de armazenamento do digestato, utilizou-se a metodologia de cálculo de Deublein et al [36], a qual tem em conta critérios para o desenho de biodigestores de fluxo contínuo, com agitação e aquecimento, construídos com materiais de concreto e revestidos com isolante, para ajudar a conservar a temperatura do biodigestor.

Para o dimensionamento do biodigestor, considerou-se os sólidos totais máximos admissíveis para a digestão úmida de 12%, calculada considerando a quantidade de substrato incorporado diariamente ao biodigestor multiplicado pelo tempo de retenção hidráulico. Além disso tem-se em conta o fator de projeto, principalmente para a instalação de acessórios no reator. No caso dos substratos líquidos e semilíquidos, assume-se uma densidade equivalente a 1.000 kg/m<sup>3</sup> e no caso das silagens a densidade de 700 kg/m<sup>3</sup>. Os dados de projeto para o sistema de biodigestão são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros de projeto do sistema de biodigestão

| Parâmetros                          | Unidades          | Tanque de<br>preparação | Silo  | Biodigestor | Tanque de<br>armazenamento de<br>digestato |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------------|-------|-------------|--|
| Tempo de retenção                   | dia               | 10,00                   | 10,00 | TRH         | 10,00                                      |
| Fator de projeto                    | f                 | 1,25                    | 1,00  | 1,25        | 1,10                                       |
| Relação altura/diâmetro             | H/D               | 2                       | -     | 1/2         | 1/3  |
| Densidade de substrato/co-substrato | kg/m <sup>3</sup> | 1.000                   | 700   | 1.000       | 1.000                                      |

Fonte: adaptado de [71]

Para o dimensionamento dos sistemas de biodigestão (biodigestor, tanque de preparação de esterco bovino, silo para armazenamento dos silagens e tanque de armazenamento de digestato) utilizou-se as equações 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7. Para o dimensionamento do volume do gasômetro para armazenamento de biogás, considerou-se a relação de volume de biodigestor/volume de gasômetro de 1:1, tendo em consideração que o armazenamento tem que ser no mínimo, suficiente para um dia de produção de biogás.

$$V_{BD} = \dot{M}_T \times \rho^{-1} \times TRH \times f_{BD} \quad (4.4)$$

Onde:

$V_{BD}$  = Volume do biodigestor [m<sup>3</sup>];

$\dot{M}_T$  = Massa total dos substratos e co-substratos adicionado diariamente [ton/dia];

$\rho$  = Densidade de substratos a ingressar no biodigestor [ton/m<sup>3</sup>];

$TRH$  = Tempo de retenção hidráulica [dias];

$f_{BD}$  = Fator de projeto para o biodigestor

Tanque de preparação

$$V_{PT} = \dot{M}_{SP+água} \times \rho^{-1} \times TR \times f_{PT} \quad (4.5)$$

Silo (armazenamento de silagens)

$$V_S = \dot{M}_{CO} \times \rho^{-1} \times TR \times f_S \quad (4.6)$$

Tanque de armazenamento de digestato

$$V_{AD} = \dot{M}_{AD} \times \rho^{-1} \times TR \times f_{AD} \quad (4.7)$$

Onde:

$V_{PT}$ ;  $V_S$ ;  $V_{AD}$  = Volume dos componentes [ $m^3$ ];

$\dot{M}_{SP+água}$ ;  $\dot{M}_{CO}$ ;  $\dot{M}_{AD}$  = Massa total dos substratos para cada componente [ton/dia];

$\rho$  = Densidade dos substratos/co-substratos [ton/ $m^3$ ];

$TR$  = Tempo de retenção para cada componente [dias];

$f_{PT}$ ;  $f_S$ ;  $f_{AD}$  = Fator de projeto para cada componente

#### 4.1.4. Gasto energético do biodigestor

É importante determinar o gasto energético do biodigestor, pois a quantidade de energia que este necessita será descontada da quantidade de energia gerada por ano. O gasto energético da usina de biogás, dá-se principalmente, pelo aquecimento do biodigestor, utilização de bombas para o bombeamento de substrato líquido ao biodigestor desde o tanque de preparação de esterco, transportadores de silagem de milho desde o silo até o biodigestor e agitadores para a agitação do biodigestor, em baixa rotações. Além disso, e somado ao gasto energético o consumo de energia do processo de dessulfurização descrito mais em frente.

Os cálculos das demandas de calor e perdas de calor no biodigestor foram feitos a partir da metodologia para biodigestores descrita por Deublein et al [71], que fornece valores padrão dos coeficientes de transferência de calor para biodigestores, e Rutz [44], que fornece detalhes das perdas de calor do sistema. O cálculo da demanda de energia e perdas de calor foi feita utilizando as equações 4.8, 4.9 e 4.10, respetivamente.

$$Q_{SU} = m_t \times Cp \times (T_2 - T_1) \quad (4.8)$$

Onde:

$Q_{SU}$  = Calor requerido para aquecer o substrato [kWh/a];

$m_t$  = Fluxo de massa de mistura de substrato [ton/h];

$Cp$  = Calor específico de substrato [kJ/kg.°C];

$T_1$  = Temperatura de inicial de substrato [°C];

$T_2$  = Temperatura da biodigestão [°C]

$$Q_{Perdido} = A \times U \times (T_2 - T_1) \quad (4.9)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_a}} \quad (4.10)$$

Onde:

$Q_{Perdido}$  = Calor perdido nas superfícies do biodigestor [kWh/a];

$A$  = Área de transferência de calor [m<sup>2</sup>];

$U$  = Coeficiente global de transferência de calor [W/m<sup>2</sup>°C];

$T_1$  = Temperatura ao exterior do biodigestor [°C];

$T_2$  = Temperatura ao interior do biodigestor [°C];

$h_i$  = Coeficiente de transferência de calor ao interior do biodigestor [W/m<sup>2</sup>°C];

$h_a$  = Coeficiente de transferência de calor ao exterior do biodigestor [W/m<sup>2</sup>°C];

$d_1$  = Espessura de isolante 1 [m<sup>2</sup>];

$d_2$  = Espessura de isolante 2 [m<sup>2</sup>];

$k_1$  = Condutividade térmica do isolante 1 [W/m°C];

$k_2$  = Condutividade térmica do isolante 2 [W/m°C]

Para os cálculos do gasto energético, considerou-se os valores de coeficientes de transferência de calor, condutividade térmica das isolantes do biodigestor, temperaturas de digestão anaeróbia e calor específico dos substratos, os quais são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros da avaliação das demandas e perdas de calor no biodigestor

| Parâmetros   | Unidade                               | Valor | Ref.      |
|--|---------------------------------------|-------|-----------|
| Temperatura da biodigestão (interior)                          | T <sub>2</sub> [°C]                   | 38,0  | [118,142] |
| Temperatura inicial do substrato (exterior)                    | T <sub>1</sub> [°C]                   | 25,0  | [175]     |
| Calor específico de substrato                                  | C <sub>p</sub> [kJ/kg.°C]             | 4,19  | [176]     |
| Coefficiente de transferência de calor no interior do digestor | h <sub>i</sub> [W/m <sup>2</sup> .°C] | 4.000 | [71]      |
| Coefficiente de transferência de calor no exterior do digestor | h <sub>a</sub> [W/m <sup>2</sup> .°C] | 400   | [71]      |
| Espessura de isolamento, poliestireno                          | d [m]                                 | 0,10  | [71]      |
| Condutividade térmica, poliestireno                            | k [W/m.K]                             | 0,05  | [71]      |

Fonte: adaptado de [71,118,142,175,176]

Para determinar o gasto energético, dos outros componentes, tais como transportadores do silo, agitadores e bombas, tomaram-se em conta dados padrão de projeto dos componentes de uma usina de biogás com agitação e aquecimento e mistura de substratos. Para determinar a potência de bombeamento utilizou-se a equação 4.11. Além disso, o gasto energético dos outros componentes, é determinado a partir do tempo de utilização dos equipamentos, tendo em consideração quantidade de substrato bombeado, quantidade de co-substrato transportado do silo ao biodigestor e volume do biodigestor, no caso da agitação (vide Tabela 4.5). O equipamento para realizar a dessulfurização é de tipo biológico (BiogasClean®), sendo que ele também tem gasto energético, que é considerado no balanço final, o qual é determinado tendo em consideração os dados fornecidos na Tabela 4.6.

Tabela 4.5 – Parâmetros da avaliação do gasto energético no bombeamento, transportador do silo e agitação do sistema de biodigestão

| Equipamento            | Parâmetro                                  | Unidade                        | Valor | Ref.  |
|------------------------|--|--------------------------------|-------|-------|
| Bomba                  | Varição de pressão (pressão de carga)      | bar                            | 1,00  | [71]  |
| Bomba                  | Eficiência                                 | $\eta$                         | 0,50  | [71]  |
| Bomba                  | Tempo de bombeamento (carga completa)      | horas                          | 5,00  | [71]  |
| Transportadora do silo | Potência nominal da correia transportadora | kW                             | 5,00  | [71]  |
| Transportadora do silo | Capacidade nominal                         | ton/h                          | 1,00  | [71]  |
| Agitação               | Densidade energética                       | W/m <sup>3</sup> <sub>BD</sub> | 10    | [149] |
| Agitação               | Tempo de trabalho                          | min/h                          | 5,00  | [71]  |

Fonte: adaptado de [27,71]

$$P_{VP} = \frac{\dot{V}_{VP} \times \Delta P_{VP} \times 100}{\eta \times 3600} \quad \therefore \quad \dot{V}_{VP} = \frac{V_{BD}}{t_B} \quad (4.11)$$

Onde:

$\dot{V}_{VP}$  = Velocidade nominal de bombeamento [m<sup>3</sup>/h];

$V_{BD}$  = Volume do biodigestor [m<sup>3</sup>];

$t_B$  = Tempo de bombeamento (carga completa) [horas];

$P_{VP}$  = Potência da bomba [kW];

$\Delta P_{VP}$  = Variação de pressão (pressão de carga) [bar];

$\eta$  = eficiência

Tabela 4.6 – Consumo energético dos sistemas de remoção biológica de H<sub>2</sub>S (BiogasClean®)

| Parâmetro  | Unidade           | Valor |        |        |        |
|------------|-------------------|-------|--------|--------|--------|
| Capacidade | m <sup>3</sup> /h | 200   | 500    | 1.000  | 2.000  |
| Consumo    | kWh/ano           | 9.000 | 12.000 | 21.000 | 24.000 |

Fonte: [177]

Na Figura 4.4, mostra-se o diagrama de fluxo das etapas envolvidas para realizar a avaliação técnica, na qual parte das potências avaliadas, tendo em consideração as etapas envolvidas, até chegar a especificar e dimensionar os sistemas.

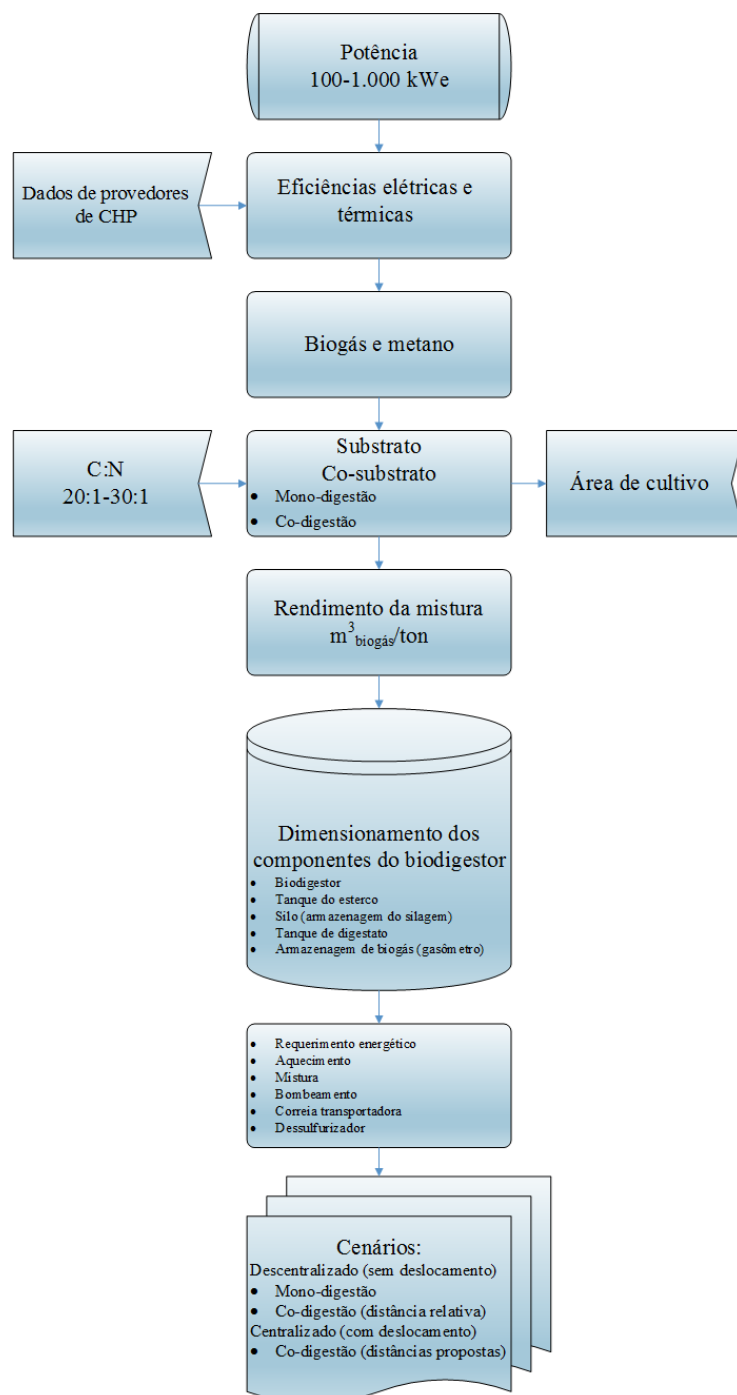


Figura 4.4 – Etapas desenvolvidas para a avaliação técnica

## 4.2. Descrição dos cenários

Os cenários propostos estão baseados na geração de energia elétrica a partir de biogás proveniente da digestão anaeróbia de sistemas centralizados e descentralizados visando a obter o cenário ideal de maior rentabilidade econômica, tamanho de usina versus distância de transporte de co-substrato, por isso os cenários são estabelecidos com base nos seguintes critérios:

- Tipo de sistema a avaliar, centralizado e descentralizado.
- Tamanho de usina a avaliar em termos de potência elétrica instalada, tendo usinas de 100 kWe, até 1.000 KWe.
- Mistura de substrato principal (esterco de gado) com co-substratos (silagem de milho e silagem de capim), a qual deve-se avaliar previamente, para determinar qual seria a percentagem de co-substrato a utilizar.
- Distância de transporte do co-substrato, com distâncias nos intervalos de 0 km até 30 km. Para o caso dos sistemas descentralizados, foram tomados em consideração as distâncias médias de transporte.

A avaliação técnica feita fornece alguns valores das características dos sistemas, em relação ao tamanho, tipo de sistema ou quantidade de mistura utilizada. No entanto, os detalhes do tamanho do biodigestor e seus componentes foram o principal insumo que serviram para efetuar a análise econômica dos diferentes cenários.

Os cenários a analisados podem ser divididos em 2 grupos: o primeiro cenário, consiste na digestão anaeróbia para sistemas descentralizados, sendo por sua vez divididos em dos sub cenários de mono digestão e co-digestão; no segundo cenário, considerou-se a digestão anaeróbia de sistemas de produção centralizados, os quais utilizam co-substratos para o funcionamento da usina.

### **Cenário 1. Produção de biogás descentralizado (vide Figura 4.5)**

- a) É o cenário base, no qual obtém-se a produção de biogás a partir de esterco de gado em sistemas de mono-digestão. O cenário busca determinar se o fator de escala pode influenciar na avaliação dos diferentes indicadores econômicos para os diferentes

tamanhos de usinas. Além disso, serve como cenário de comparação para os outros cenários por ser o tipo de digestão anaeróbia tradicional onde, as distâncias de transporte não são consideradas.

- b) Tem as mesmas características do cenário 1 (a); no entanto, é introduzido o conceito da utilização de co-substrato como a silagem de milho e silagem de capim misturado com o substrato principal. Neste caso, tampouco tem-se em consideração as distâncias de transporte de co-substrato e realiza-se a avaliação dos indicadores econômicos para os diferentes tamanhos das usinas.

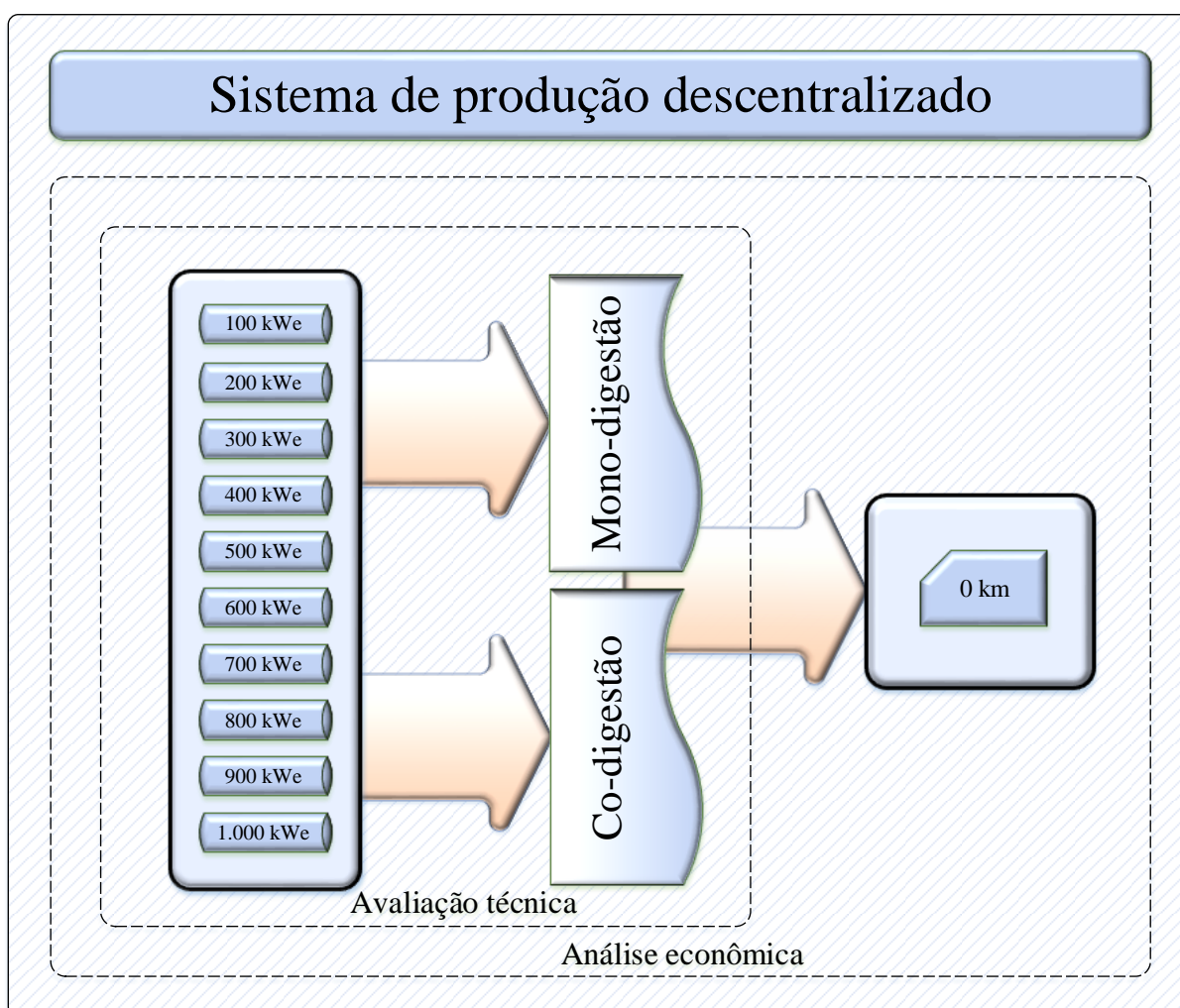


Figura 4.5 – Cenários avaliados para a produção de biogás em sistemas descentralizados

## Cenário 2. Produção de biogás descentralizado (vide Figura 4.6)

- a) Este cenário está baseado no conceito de usina centralizada, onde os co-substratos (silagem de milho e silagem de capim) são misturados com o substrato base (esterco de bovino), além de considerar as distâncias relativas ao transporte de matéria-prima, desde lugares distantes de 5 até 30 km.

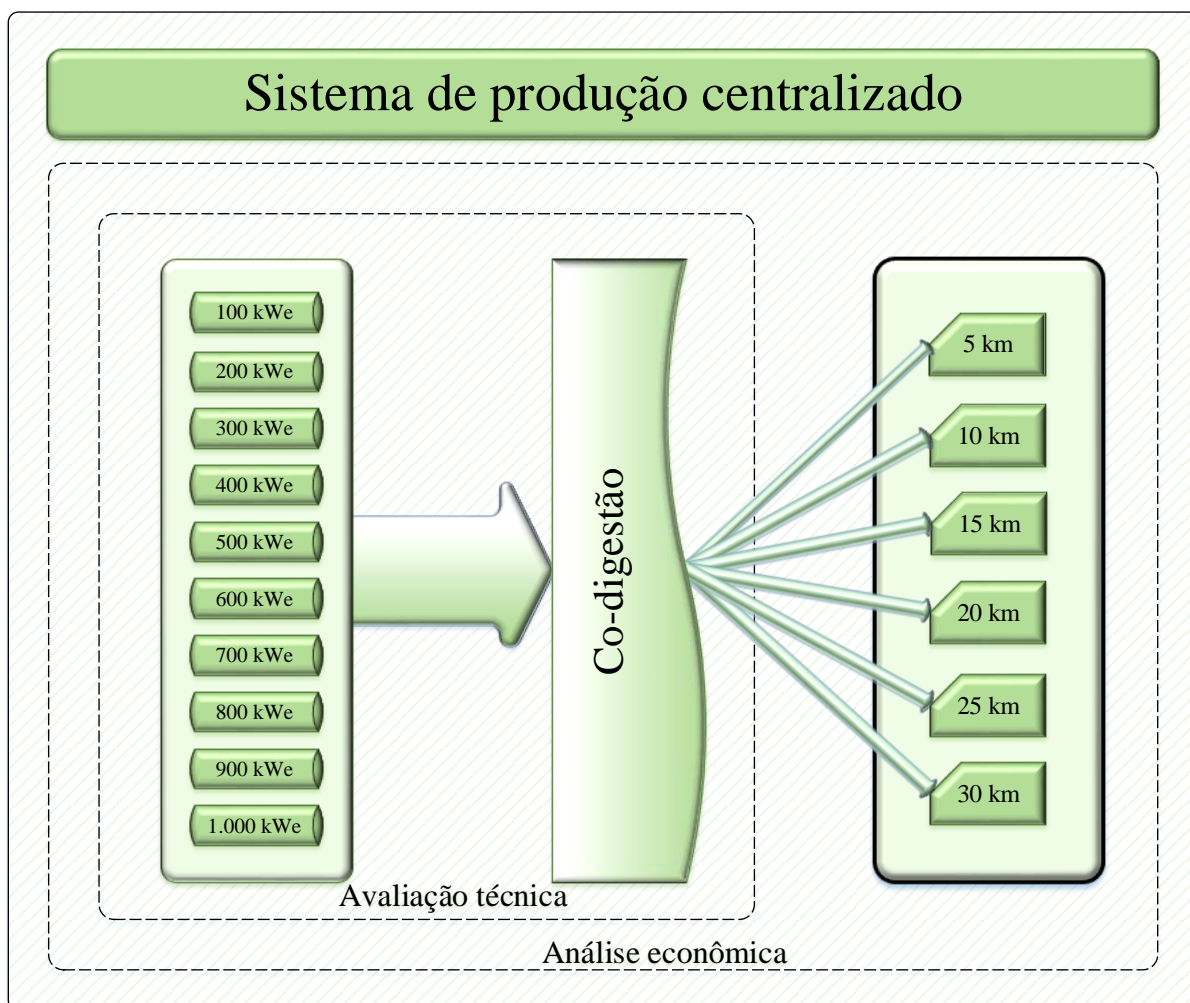


Figura 4.6 – Cenários avaliados para a produção de biogás em sistemas centralizados

### 4.3. Modelo de análise econômica

A metodologia aplicada é baseada na análise dos investimentos, na qual se faz uma análise das oportunidades de investimento de capital, utilizando diferentes ferramentas para avaliar a rentabilidade e analisar a viabilidade econômica das alternativas tecnológicas selecionadas [178,179]. A análise de investimentos de capital requer um grau razoável de raciocínio econômico e projeção das condições futuras [178]. Por tanto, para fazer a análise econômica das alternativas propostas utiliza-se métodos comumente empregados para análise e tomada de decisões, tais como o Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Tempo de Retorno de Capital (TRC). Além disso, faz-se também uma análise de sensibilidade de alguns fatores importantes, que possam influenciar na tomada de decisões.

#### 4.3.1. Principais indicadores econômicos – conceitos importantes

##### 4.3.1.1. Valor presente líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido (VPL) tem a finalidade de comparar em termos de valor presente, o impacto de eventos futuros associados a uma alternativa de investimento [178]. Geralmente, é utilizado quando se deseja comparar várias alternativas mutuamente excludentes, medindo o valor presente dos fluxos de caixa gerados pelo projeto ao longo de um intervalo de tempo estabelecido ou vida útil [178,180,181]. O VPL de um fluxo de caixa para uma alternativa é, portanto a soma algébrica dos valores presentes envolvidos neste fluxo de caixa e pode representar-se por meio da equação 4.12.

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (4.12)$$

Onde:

$FC_t$  = fluxos de caixa dos valores envolvidos que ocorrem em n períodos;

$I$  = investimento inicial;

$i$  = taxa mínima de atratividade, taxa de desconto ou taxa de juros comparativa;

$n$  = número de períodos envolvidos no fluxo de caixa;

O objetivo da utilização do valor presente líquido é encontrar alternativas de investimento que valham mais do que custam para os financiadores do projeto, tendo como regra geral que só pode empreender o projeto se o VPL é positivo [178]. No entanto, para comparar diferentes alternativas de projeto pode utilizar-se o critério de qual das iniciativas tem maior VPL [180].

$VPL > 0 \rightarrow$  atrativo (selecionar alternativa de maior VPL)

$VPL < 0 \rightarrow$  não atrativo

$VPL = 0 \rightarrow$  indiferente

#### 4.3.1.2. Taxa interna de Retorno (TIR)

O método de análise utilizando a Taxa Interna de Retorno (TIR) tem a finalidade de estabelecer qual é a rentabilidade absoluta a determinada Taxa Mínima de Atratividade (TMA), ou também chamado custo de capital, sendo que por definição, a TIR é a taxa de retorno do investimento [178]. Matematicamente, a TIR é uma taxa de juros que anula o valor do VPL do empreendimento, igualando o valor presente das receitas (benefícios) aos valores presentes dos custos de investimento e operação do projeto [180]. A TIR pode representar-se por meio das equações 4.13 e 4.14.

$$VPL = B - C = 0 \therefore B = C \quad (4.13)$$

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} = 0 \therefore I = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} \quad (4.14)$$

Onde:

$FC_t$  = fluxos de caixa dos valores envolvidos que ocorrem em  $n$  períodos;

$I$  = investimento inicial;

$n$  = número de períodos envolvidos no fluxo de caixa;

$B$  = valor presente das receitas (benefícios);

$C$  = valores presentes dos custos de investimento e operação

A TIR é um método amplamente recomendável para analisar a viabilidade econômica de um projeto isolado, sem comparação com alternativas excludentes [180]. Sendo assim, para analisar um projeto poderia afirmar-se os seguintes critérios, tendo em consideração que “ $i$ ” é a taxa mínima de atratividade de referência.

$TIR > i \rightarrow$  atrativo

$TIR < i \rightarrow$  não atrativo

$TIR = i \rightarrow$  indiferente

#### 4.3.1.3. Tempo de retorno de capital (TRC) ou Payback (PB)

O Tempo de Retorno de Capital (TRC) pode ser analisado a partir de dois pontos de vista; o primeiro, o tempo de retorno de capital não descontado, e o segundo, o tempo de retorno de capital descontado.

O tempo de retorno de capital não descontado é o tempo necessário para o retorno do investimento inicial, sem levar em conta as taxas de juros e de aumento das grandezas monetária durante o análise do projeto [180]. O TRC não descontado é determinado pela divisão do custo de implantação do projeto pelo benefício líquido periódico esperado (vide equação 4.15).

$$TRC = \frac{I}{BL} \quad (4.15)$$

Onde:

$I$  = investimento inicial;

$BL$  = benefício líquido periódico

O tempo de retorno de capital descontado, no entanto, representa o número de períodos que anula o valor presente líquido do projeto, levando em conta a taxa de desconto (juros) e de incremento das parcelas incidentes no fluxo de caixa [180]. O TRC descontado consiste em calcular valores de VPL para valores crescentes de número de períodos e verificar qual valor “ $n = TRC$ ” anula o valor presente líquido, e pode expressar-se segundo a equação 4.16.

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} = 0 \quad \therefore \quad I = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (4.16)$$

Onde:

$FC_t$  = fluxos de caixa dos valores envolvidos que ocorrem em  $n$  períodos;

$I$  = investimento inicial;

$i$  = taxa mínima de atratividade, taxa de desconto ou taxa de juros comparativa;

$n$  = número de períodos que anula o VPL

#### 4.3.1.4. Fluxo de caixa

Fluxo de caixa consiste nas entradas e saídas de capital ao longo do horizonte do projeto, que resumem as entradas (receita) e saídas efetivas de dinheiro (custos), permitindo analisar a rentabilidade e viabilidade econômica. Estas estimativas são feitas para cada alternativa e sem elas, nenhum estudo de engenharia econômica pode ser realizado [181]. No fluxo de caixa feito para cada iniciativa é possível utilizar os indicadores econômicos para realizar a análise de investimentos.

#### **4.3.1.5. Taxa mínima de atratividade (TMA)**

É a taxa a partir do qual o investidor considera que está recebendo lucro financeiro [179]. Para que um investimento seja lucrativo, o investidor espera receber mais dinheiro do o que capital investido, então a TMA pode definir-se como o mínimo que um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento. Segundo Blank [181], a TMA é a taxa razoável mais alta do que a taxa esperada de um banco ou investimento seguro, que envolva um risco mínimo de investimento. Como regra geral uma rentabilidade mais alta significa um maior risco [178]. A taxa mínima de atratividade também é chamada taxa de desconto, taxa de juros comparativa, taxa de equivalência ou taxa de expectativa [182].

A TMA para pessoas físicas no Brasil é comumente igual à rentabilidade das cadernetas de poupança, enquanto para empresas a determinação de TMA é mais complexa e depende do prazo ou da importância estratégica das alternativas e é estabelecida por gerentes financeiros ou por organismos internacionais como o Fundo Monetário Internacional (FMI) [179]. Entre os fatores que mais influenciam a TMA se encontram, taxa de juros dos bancos do investimento, risco do negócio, risco de investimento no país, valorização dos títulos públicos e rentabilidade da empresa [179].

#### **4.3.1.6. Análise de sensibilidade**

Para a decisão final de implantação de um projeto, considera-se os indicadores econômicos como VPL e TIR, mas é importante uma análise do comportamento de alguns dos indicadores frente aos diversos cenários de exploração do projeto, sendo que a análise de sensibilidade deverá ser feita no mínimo, sobre a variação da taxa mínima de atratividade (juros) TMA [180]. Além disso, a análise de sensibilidade também pode ser feita em relação a outros parâmetros, que possam variar drasticamente a rentabilidade de um projeto [179].

### 4.3.2. Redução Certificada de Emissões (RCE)

O modelo de análise econômica contempla também a utilização dos créditos da Redução Certificada de Emissões (RCE) por evitar liberar o metano que se geraria pela fermentação entérica dos dejetos bovinos e pelo tratamento dos mesmos, sendo que o metano tem o potencial de aquecimento global de 25 vezes maior que o dióxido de carbono [58,59]. Também pode ser obtido RCE pela geração de energia renovável, a qual contribui à matriz energética brasileira. Para a análise das receitas obtida pela utilização de RCE se tem em conta as equações 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20. A intensidade de carbono na geração de energia elétrica brasileira considerado foi de 0,137 ton CO<sub>2</sub>Eq por cada MWh gerado [10,11].

$$(CO_2Eq)_{queima} = FE_{queima} \times EM \quad (4.17)$$

$$(CO_2Eq)_{geração} = EE \times FE_{energia} \quad (4.18)$$

$$CO_2Eq = [(CO_2Eq)_{queima} + (CO_2Eq)_{geração}] \quad (4.19)$$

$$RCE = CO_2Eq \times VRCE \quad (4.20)$$

Onde:

$(CO_2Eq)_{queima}$  = dióxido de carbono equivalente evitado pela queima [ton CO<sub>2</sub>Eq/ano];

$(CO_2Eq)_{geração}$  = dióxido de carbono equivalente evitado pela geração [ton CO<sub>2</sub>Eq/ano];

$FE_{metano}$  = fator de emissão pela queima do metano [ton CO<sub>2</sub>Eq/ ton CH<sub>4</sub>];

$EM$  = total de metano produzido por ano [ton CH<sub>4</sub>/ano];

$FE_{energia}$  = fator de emissão de energia elétrica gerada [ton CO<sub>2</sub>Eq/MWh];

$EE$  = total de energia elétrica gerada por ano [MWh/ano];

$CO_2Eq$  = total de dióxido de carbono equivalente evitado [ton CO<sub>2</sub>Eq/ano];

$RCE$  = Total de reduções certificadas de emissões por ano [USD/ano];

$VRCE$  = Valor da redução certificada de emissões [USD/ton CO<sub>2</sub>Eq]

### 4.3.3. Transporte de co-substratos

O custo de transporte de biomassa depende de vários fatores, principalmente da distância percorrida e da quantidade de material transportado. No entanto, para determinar o custo de transporte é necessário conhecer os custos fixos e custos variáveis atribuídos ao veículo que vai transportar o substrato [183,184]. Para determinar o custo de transporte, foram considerados dados referenciais do transporte de biomassa proveniente da colheita de cana de açúcar no contexto brasileiro, sendo que esta é transportada, em sua maioria, picada até a usina de álcool [185]. Assim, os co-substratos utilizados como silagens de milho e silagens de capim são transportados picadas até usina de biogás, para serem armazenados e ensilados.

Para estimar o custo de transporte mensal, tem-se em consideração os parâmetros de transporte de biomassa agrícola da Tabela 4.7 para diversos veículos de transporte de biomassa, sendo que o transporte por Treminhão e Rodotrem, com capacidade de 45 e 65 toneladas respectivamente, transportam biomassa picada e podem trafegar 24 horas por dia com paradas periódicas para manutenção [185].

Tabela 4.7 – Parâmetros de transporte de biomassa agrícola

| Parâmetros                          | Unidade | Tipo de Transporte |           |          |
|-------------------------------------|---------|--------------------|-----------|----------|
|                                     |         | Romeu e Julieta    | Treminhão | Rodotrem |
| Capacidade do caminhão              | ton     | 25                 | 45        | 65       |
| Tempo de carga e descarga           | horas   | 0,70               | 1,25      | 1,80     |
| Tipo de caminho                     | -       | Rural              | Rural     | Rural    |
| Velocidade do caminhão descarregado | km/h    | 35                 | 35        | 35       |
| Velocidade do caminhão carregado    | km/h    | 10                 | 10        | 10       |
| Custo fixo mensal                   | USD     | 3.947              | 5.724     | 8.710    |
| Custos Variáveis                    | USD/km  | 0,25               | 0,30      | 0,42     |

Fonte: adaptado de [186]

As equações 4.21, 4.22, 4.23, determinam o custo de transporte por tonelada de co-substrato para um veículo de transporte e para uma distância de transporte, tendo em consideração os custos fixos e custos variáveis atribuídos ao transporte utilizado.

$$C_{mês} = CV \times KM + CF \quad (4.21)$$

$$KM = N_{mes}^o \times d \times 2 \quad (4.22)$$

$$C_{USD/ton} = \frac{C_{mês}}{Q_{ton/mês}} \quad (4.23)$$

Onde:

$C_{mês}$  = custo de transporte mensal [USD/mês];

$CV$  = custo variável por quilômetro [USD/km];

$CF$  = custo fixo de transporte [USD/mês];

$KM$  = distância percorrida por mês [km];

$N_{mes}^o$  = quantidade de viagens por mês;

$d$  = distância de transporte de co-substrato [km];

$Q_{ton/mês}$  = quantidade de co-substrato transportado por mês [ton/mês];

$C_{USD/ton}$  = custo de transporte por tonelada [USD/ton]

Para os sistemas descentralizados de digestão anaeróbia que fazem co-digestão de silagem de capim e silagem de milho considerou-se que eles são plantados em torno à usina formando um círculo, e distribuídos uniformemente. Para determinar a distância média de transporte de substratos nestes cenários, foram utilizadas as equações 4.24 e 4.25, descritas por Overend [187], as quais também foram utilizadas por Wright et al [188], Walla et al [52] e Smyth et al [189], para avaliar sistemas de produção centralizada de biogás e biorrefinarias. O modelo

desenvolvido por Overend [187], é um modelo para calcular as distâncias médias de transporte de biomassa até uma usina central, tendo em consideração que as plantações se encontram nos arredores da usina. Neste trabalho, considera-se uma superfície disponível ao redor da usina de 90%, o que supõe que o terreno tem boa aptidão para a mecanização agrícola.

$$R_{max} = \sqrt{\frac{Q}{y\pi f}} \quad (4.24)$$

Onde:

$R_{max}$  = distância máxima em torno da usina na qual a silagem deve ser entregue [km];

$Q$  = quantidade requerida de matéria-prima (silagem) [ton/a];

$y$  = rendimento de produção da silagem [ton/ha];

$f$  = fração de superfície disponível ao redor da usina (depende da geografia)

A distância média de transporte de silagem até o centro do círculo onde se encontra a usina, é maior do que a distância radial (em linha reta) e depende da natureza do caminho por onde se vai transportar a silagem, o que pode ser definido pelo fator de tortuosidade. Fatores de 1,27 são consideradas para regiões agrícolas altamente desenvolvidas, onde os caminhos estão dispostos em grades retangulares, enquanto que fatores de 3,0, são considerados para as regiões menos desenvolvidas, com um terreno complexo ou montanhosos restrito pelas suas características geográficas, tais como lagos e pântanos [187,188,190]. Estudos sobre o tema determinaram fatores de tortuosidade de 1,27 até 1,42 para a província de Alberta no Canada [191]. No entanto, para o desenvolvimento do trabalho se considerou um fator de tortuosidade de 2,0, considerado o transporte através de caminhos rurais [189].

$$\bar{R} = \frac{2}{3} R_{max} \tau \quad (4.25)$$

Onde:

$\bar{R}$  = distância média de transporte de silagem [km];

$\tau$  = fator de tortuosidade

#### 4.3.4. Fator de escala e custo dos equipamentos

Na economia de escala, os custos de capital são classicamente expressos com uma função exponencial [190]. Para determinar os custos dos equipamentos para os diferentes tamanhos das usinas, tem-se em conta os custos dos equipamentos das Tabela 4.8, que representam os custos padrões dos equipamentos para uma usina de biogás utilizando silagem de milho de 100 kWe de potência instalada.

Tabela 4.8 – Custo dos equipamentos de uma usina de biogás com potência de 100 kWe

| Parâmetro   |     | Custo   | Ref.  |
|---|-----|---------|-------|
| Reator de digestão anaeróbia + agitação e aquecimento | USD | 136.505 | [149] |
| Moto-gerador Otto gás (CHP)                           | USD | 223.790 | [149] |
| Tanque de preparação (esterco bovino)                 | USD | 28.613  | [149] |
| Silo (coberta de silo)                                | USD | 14.973  | [71]  |
| Sistema de bombeamento                                | USD | 9.536   | [149] |
| Armazenamento de biogás                               | USD | 26.751  | [170] |
| Tanque de digestato                                   | USD | 59.235  | [149] |
| Queimador   | USD | 23.425  | [149] |
| Conexão à rede  | USD | 109.617 | [149] |

Fonte: adaptado de [71,149,170]

Para determinar os custos dos equipamentos que conformam a usina de biogás, tem-se em conta o fator de escala. Assim, o custo específico dos equipamentos para produção de biogás, são menores quando se incrementa seu tamanho, o qual é consistente com a prática atual no projeto de engenharia, podendo ser calculado de acordo com a equação 4.26 [166,167,190].

$$\frac{C}{C_0} = \left( \frac{M}{M_0} \right)^{2/3} \quad (4.26)$$

Onde:

$C; M$  = custo e tamanho do equipamento a avaliar;

$C_0; M_0$  = custo e tamanho de referência do equipamento

Embora existam diferentes modelos para determinar os custos para remoção do sulfeto de hidrogênio do biogás, tais como o desenvolvido por Frare [192], neste trabalho o custo dos equipamentos para limpeza de biogás, são considerados tendo em conta os dados fornecidos para limpeza de biogás para diferentes capacidades de processamento, como é mostrado na Tabela 4.9. Para este caso, o sistema utilizado é o sistema de remoção biológica de sulfeto de hidrogênio (BiogasClean®), o qual, para seu funcionamento, precisa de nutrientes como nitrogênio, fosforo e potássio (NPK).

Tabela 4.9 – Custo dos sistemas de remoção biológica de sulfeto de hidrogênio para diferentes fluxos de biogás (BiogasClean®)

| Parâmetro      | Unidade           | Dessulfurizador |         |         |         |
|----------------|-------------------|-----------------|---------|---------|---------|
| Capacidade     | m <sup>3</sup> /h | 200             | 500     | 1.000   | 2.000   |
| Investimento   | USD               | 123.167         | 169.369 | 200.189 | 277.154 |
| Eletricidade   | kWh/ano           | 9.000           | 12.000  | 21.000  | 24.000  |
| Nutrientes NPK | USD/ano           | 381             | 810     | 1.622   | 3.243   |

Fonte: adaptado de [177]

Os custos operativos de usinas de digestão anaeróbia referentes a salário de pessoal, eletricidade para bombeamento e agitação, e combustível para aquecimento, pode depender do tipo do processo. No entanto, alguns trabalhos prévios sugerem um custo operacional anual para usinas de digestão anaeróbia de 10-12% do valor do investimento, sendo que em alguns países, como a Inglaterra e Suécia, utiliza-se valores de 4% e 15%, respetivamente [189]. Para o análises das usinas de biogás utilizando silagem como co-substrato, utilizou-se um custo operacional de 6% com respeito ao seu investimento inicial [167].

Os custos de operacionais neste trabalho incluem custos de operação e manutenção dos equipamentos da usina, gastos de salário de pessoal, monitoramento, análises de laboratório; sendo que se considerou de 8% com relação ao custo do investimento. Este custo não inclui os

custos de manutenção do sistema de limpeza biológico de biogás (dessulfurizador BiogasClean®), tampouco incluem os custos de compra e transporte de co-substratos de silagens, os quais são incorporados ao fluxo de caixa, dependendo da quantidade de co-substrato requerido.

#### 4.3.5. Outras considerações e premissas adotadas para a análise econômica

A análise econômica realizada tem por objetivo identificar a viabilidade econômica da implantação de projetos de geração de energia elétrica a partir de sistemas de digestão anaeróbia centralizada e descentralizada; para isto, avaliou-se previamente, mediante critérios técnicos, os diferentes parâmetros envolvidos na digestão anaeróbia de usinas de biogás de para diferentes cenários apresentados, tendo em consideração os diferentes tamanhos de usinas para os substratos e co-substratos utilizados, e distâncias relativas para transporte de co-substratos até o sistema centralizado.

O esterco de gado bovino é considerado como um resíduo disponível para ser aproveitado. Neste sentido, no presente trabalho, ele não tem custo dentro da análise econômica. Enquanto, as silagens de milho e capim elefante tem um custo de aquisição por tonelada em base seca. São consideradas as distâncias de transporte de silagens de 5 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km e 30 km desde as plantações até o lugar onde se encontra instalado a usina de biogás para os sistemas centralizados. Para os sistemas descentralizados com co-digestão, levou-se em conta as distâncias médias, conforme descrito anteriormente.

Tabela 4.10 – Custos dos substratos e preço de venda dos produtos principais de usinas de digestão anaeróbia

| Parâmetro                       | Unidade                | Custo [USD] | Ref.      |
|---------------------------------|------------------------|-------------|-----------|
| Esterco bovino                  | ton                    | 0,00        | -         |
| Silagem de milho (base seca)    | ton                    | 84,53       | [193,194] |
| Silagem de capim (base seca)    | ton                    | 52,66       | [193,194] |
| Energia elétrica                | MWh                    | 73,46       | [195]     |
| Redução Certificada de Emissões | ton CO <sub>2</sub> Eq | 3,76        | [196]     |
| Fertilizante (fração sólida)    | ton                    | 40,13       | [197,198] |

Fonte: adaptado de [193,194,195,196,197,198]

As receitas consideradas são provenientes da venda de energia elétrica, tendo em conta o valor do preço do último leilão de energia elétrica no Brasil (leilão Nº1/2016 A-5) do 29 de abril de 2016, com 73,46 USD/MWh [195]. As receitas das Reduções Certificadas de Emissões são calculadas de acordo com a metodologia descrita na secção 3.5, tendo em consideração o preço do último leilão feito por BM&BOVESPA (*INSTRUMENT : 001/2012*), com um valor de 3,76 USD/ton CO<sub>2</sub> Eq [196]. Neste trabalho, também são consideradas as receitas da venda de fertilizante sólido que corresponde de 5-10% da quantidade total de digestato gerado na usina de biogás [198], considerando o preço da tonelada de fertilizante sólido calculado por Nicoloso [197]. Os custos dos substratos e receitas obtidas se detalham na Tabela 4.10.

A análise de sensibilidade levou em conta, principalmente a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Também foram feitas as análises de sensibilidade do preço dos substratos, já que eles podem ser variáveis dependendo de fatores de produção agrícola. Além disso, também foi considerado na análise de sensibilidade o custo da venda de energia elétrica. Estas análises foram feitas tendo em consideração a variação do  $\pm 50\%$  do valor inicial, podendo modificar os critérios dependendo dos resultados obtidos.

Tabela 4.11 – Premissas adotadas para a avaliação econômica

| Parâmetro  | Ref.  |
|--|-------|
| Taxa mínima de atratividade (TMA): 15%   | -     |
| Vida útil do projeto: 20 anos  | -     |
| Tempo de vida útil dos equipamentos: 20 anos para o biodigestor e 120.000 horas de operação para o moto-gerador Otto gás (CHP) | [149] |
| Horas efetivas de produção e geração com biogás 8.000 horas/ano  | [52]  |
| A taxa de câmbio adotada foi de R\$ 3,51/US\$ (10/05/2016)   | [199] |

Fonte: adaptado de [52,149,199]

Na Figura 4.7, mostra-se o diagrama de fluxo das etapas envolvidas para realizar a análise econômica, na qual parte dos cenários propostos para as distintas potências avaliadas, tendo em consideração o fator de escala, distâncias médias relativas para sistemas descentralizados de co-digestão e distâncias propostas para sistemas centralizados de co-digestão, custos de investimento, custos operacionais e receitas obtidas, até chegar à análise de VPL, TIR, Payback e a análise de sensibilidade dos diferentes sistemas.

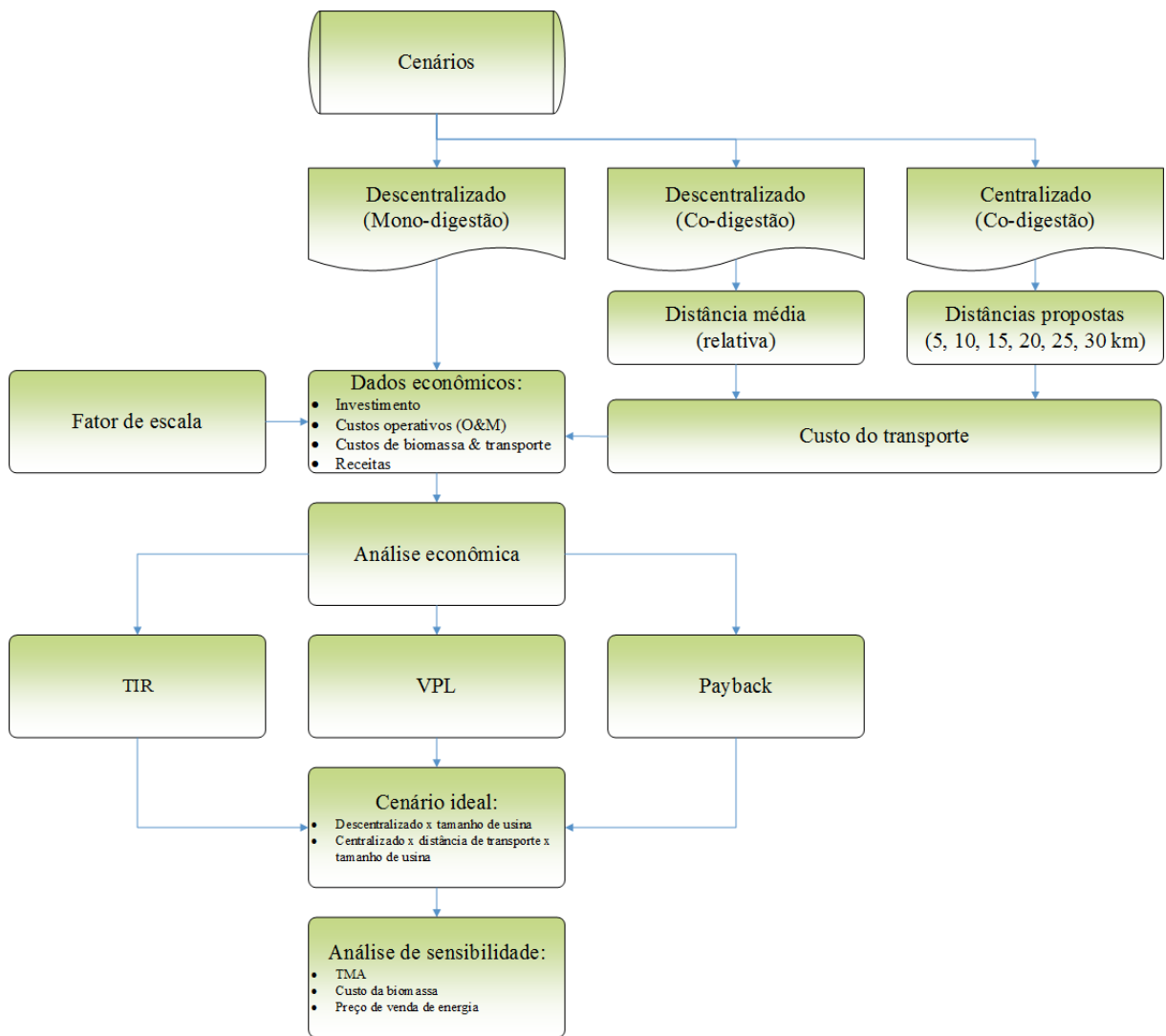


Figura 4.7 – Etapas desenvolvidas para a análise econômica

## Capítulo 5.

# RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados, a análise e discussão dos cenários avaliados para geração de energia utilizando biogás como combustível, o qual é produzido em sistemas centralizados e descentralizados em condições mesofílicas. Apresentam-se os resultados das avaliações técnicas e econômicas para a produção de biogás utilizando silagem de milho e silagem de capim como co-substratos, produzidos a diferentes distâncias do lugar onde se encontram as usinas de biogás. Assim, mostra-se a influência do deslocamento do co-substrato na rentabilidade dos diferentes tamanhos de usinas de biogás.

### 5.1. Avaliação técnica

As eficiências elétricas e térmicas para os tamanhos de usinas estabelecidas foram determinadas a partir de um ajuste dos dados fornecidos pelos fabricantes de moto-geradores Otto a gás (CHP) para diferentes potências, como mostrado na Figura 5.1. As eficiências elétricas para os sistemas avaliados encontram-se nos intervalos de 37,79-41,56%, para as potências de 100 e 1.000 kWe, respectivamente, com suas eficiências térmicas de 46,04-41,42 kWt. Segundo Lantz [158], estas eficiências elétricas em sistemas combinados de calor e

eletricidade para usinas de biogás podem variar de 30-40%, com suas correspondentes taxas de recuperação de calor entre os intervalos 35–55%. Além disso, estes geradores normalmente trabalham nos intervalos de 100 kWe até 1.000 kWe e podem alimentar-se com biogás de teores de metano a partir de 40% [44].

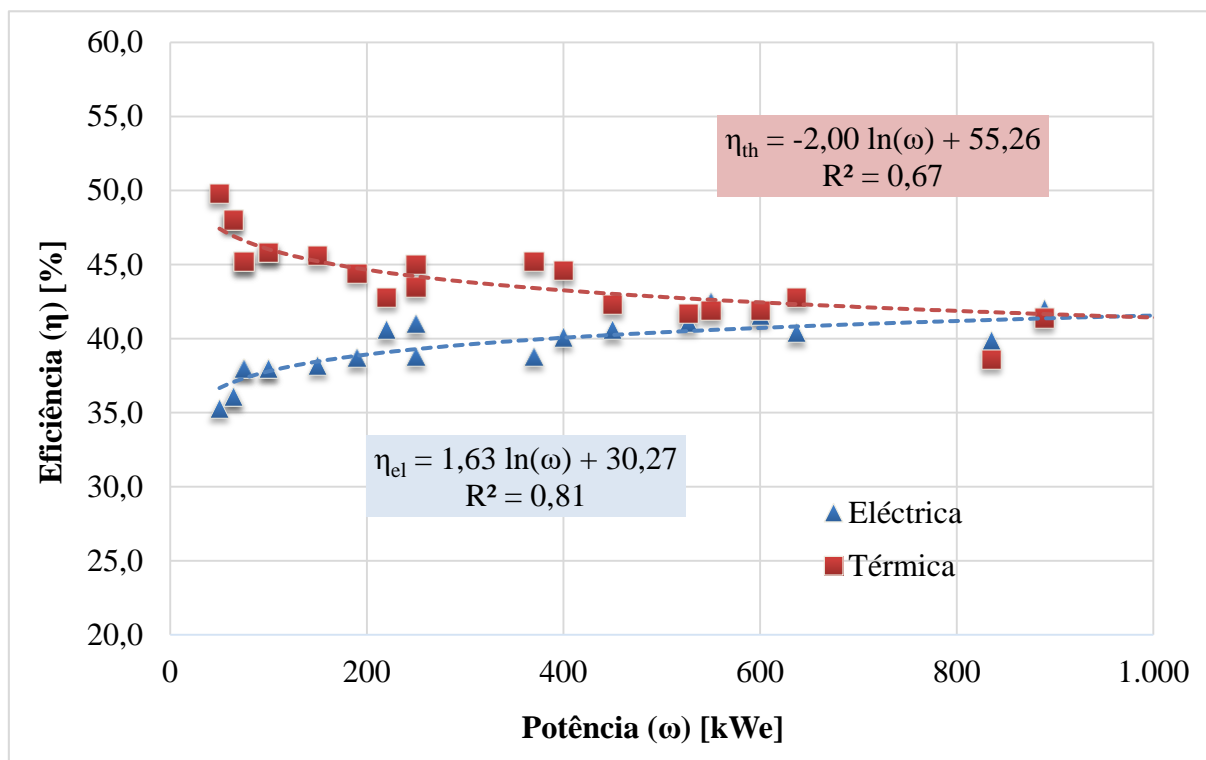


Figura 5.1 – Regressão das eficiências elétrica e térmicas de CHP para biogás

Um dos parâmetros importantes necessário para realizar co-digestão de substratos é a relação de carbono e nitrogênio da mistura, sendo que esta deve situar-se no intervalo de 20:1-30:1 para que a produção de biogás, em termos de qualidade e quantidade sejam ótimas [76,77]. Segundo Zanetti et al [72], que avaliaram a influência da relação C:N de amostras de biomassa, conclui-se, que as relações de C:N de 30:1 tem maior influência na geração de biogás. No entanto, algumas pesquisas feitas por Hills [200], concluíram que a relação ótima de C:N é de 25:1 para amostras de esterco bovino. Resultados similares foram obtidos por Wang et al [201] que avaliaram o efeito do rendimento de biogás para co-digestão de dejetos suínos e palha de trigo para diferentes relações C:N, tendo determinado que o melhor rendimento ocorre para relações C:N de 27,2:1, para relações de mistura de 40.3:59.7 de dejetos suínos e palha de trigo. As avaliações feitas por diferentes pesquisadores demonstram que a relação ótima de C:N pode

mudar dependendo da temperatura, sendo que os modelos desenvolvidos para misturas de dejetos suínos e palha de arroz tem resultados de relações ótimas de C:N de 26,76:1 para temperaturas de 35°C e 30,67:1 para temperaturas 55°C [77].

No Brasil ainda não existe uma base de dados disponível sobre os rendimentos dos substratos para a produção de biogás, ou os dados existentes de rendimentos específicos são pouco disponíveis, podendo ser estes dados diferentes devido às características dos resíduos e processo produção [125]. Os valores de potencial de rendimento de metano que geralmente são obtidos pelo métodos “*Biochemical Methane Potential*” (BMP) [117,202], fornece resultados de rendimento de biogás dos substratos nas condições ideais. Neste caso, em condições ideais de carbono nitrogênio. Sendo assim, a avaliação feita foi sobre a base destes argumentos, o que significa que as condições ótimas para estas misturas serão nos valores de C:N nos intervalos de 20:1-30:1.

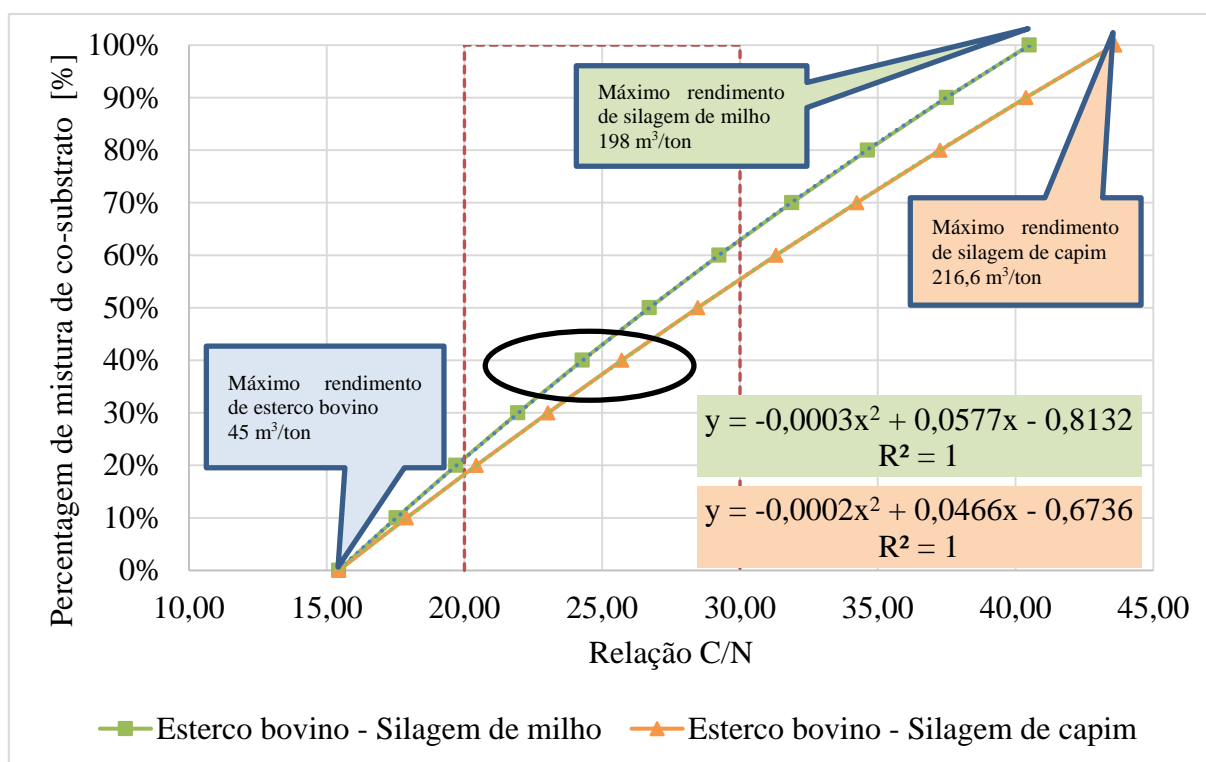


Figura 5.2 – Relação C:N das misturas bovino-milho e bovino-capim

A relação C:N considerada para a co-digestão de esterco bovino e silagens de milho e capim foi determinado sobre a base do conteúdo de nitrogênio e carbono. A Figura 5.2 mostra a avaliação efetuada, onde a quantidade máxima admissível para a digestão anaeróbia do esterco

bovino e silagem de milho está nos intervalos de 22-65%, enquanto para as misturas de esterco bovino e silagem de capim, a quantidade máxima admissível encontra-se entre os intervalos de 18-54%. Neste caso, considera-se para as avaliações dos sistemas centralizados e descentralizados, valores de mistura esterco bovino e co-substratos de 60:40, pois estes valores encontram-se próximas ao intervalo médio ideal das relações C:N de 25:1.

### 5.1.1. Requerimento de biogás e produção de energia elétrica

Foi efetuado o cálculo da produção de biogás para as diferentes potências, tendo em consideração a variação das eficiências elétricas obtidas na Figura 5.1, para usinas de biogás nos tamanhos de 100-1000 kW e considerando que a eficiência elétrica se incrementa a medida que a potência elétrica se incrementa. As eficiências de conversão elétrica dos cenários a avaliar variam desde 37,79% até 41,56% para potências de 100 kWe a 1.000 kWe, respetivamente. Igualmente as eficiências térmicas determinadas variam de 46,04% até 41,42% para potências de 100 a 1.000 kWe, respetivamente.

Tabela 5.1 – Produção de biogás e metano das diferentes potências avaliadas

| Potência elétrica [kWe] | Eficiência elétrica [%] | Energia elétrica gerada [MWh/a] | Eficiência térmica [%] | Energia térmica gerada [MWh/a] | Quantidade de biogás necessária [m <sup>3</sup> /a] | Quantidade de metano [m <sup>3</sup> /a] |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------------|---|--|
| 100                     | 37,8                    | 800                             | 46,0                   | 975                            | 351.719   | 228.617                                  |
| 200                     | 38,9                    | 1.600                           | 44,6                   | 1.835                          | 682.963   | 443.926                                  |
| 300                     | 39,6                    | 2.400                           | 43,8                   | 2.658                          | 1.007.295   | 654.742                                  |
| 400                     | 40,1                    | 3.200                           | 43,3                   | 3.456                          | 1.327.295   | 862.742                                  |
| 500                     | 40,4                    | 4.000                           | 42,8                   | 4.236                          | 1.644.148   | 1.068.696                                |
| 600                     | 40,7                    | 4.800                           | 42,4                   | 5.004                          | 1.958.539   | 1.273.051                                |
| 700                     | 41,0                    | 5.600                           | 42,1                   | 5.759                          | 2.270.912   | 1.476.093                                |
| 800                     | 41,2                    | 6.400                           | 41,9                   | 6.506                          | 2.581.576   | 1.678.024                                |
| 900                     | 41,4                    | 7.200                           | 41,6                   | 7.244                          | 2.890.762   | 1.878.995                                |
| 1.000                   | 41,6                    | 8.000                           | 41,4                   | 7.975                          | 3.198.647   | 2.079.121                                |

Na Tabela 5.1 mostra-se a vazão de biogás calculada para os diferentes cenários, tendo em consideração a eficiência de conversão elétrica e o poder calorífico do biogás, obtendo-se valores de produção de biogás, por ano, de 351.719 m<sup>3</sup> para os cenários de 100 kWe e 3.198.647

m<sup>3</sup> para os cenários de 1.000 kWe. As quantidades de metano necessária para as potências das usinas de 100 a 1.000 kWe, foram de 228.617 m<sup>3</sup> e 2.079.121 m<sup>3</sup>, respectivamente.

### 5.1.2. Quantidade de substratos

Efetuiu-se a determinação da quantidade de substratos e co-substratos que se utilizariam para as diferentes potências elétricas avaliadas, tendo em conta a potência de geração elétrica e a utilização da quantidade de co-substrato definida anteriormente (40% de mistura para os cenários onde tem co-digestão). O rendimento de biogás para as misturas de bovino-milho e bovino-capim foram de 106,21 m<sup>3</sup>/ton e 113,64 m<sup>3</sup>/ton, respectivamente.

Na Tabela 5.2 mostram-se as quantidades dos substratos e co-substratos necessários para a geração das potências estabelecidas nos cenários de mono-digestão e co-digestão, tendo em consideração as diferentes potências avaliadas, tendo que, as quantidades de esterco de gado para cada potência avaliada nos cenários de mono-digestão são maiores do que as quantidades de mistura, tanto de esterco-milho como de milho-capim. Isto devido ao fato de que o rendimento de biogás por tonelada de esterco de gado bovino é inferior ao rendimento das silagens de milho e de capim, tendo valores de rendimentos de 45 m<sup>3</sup>/ton para esterco de gado bovino, 198 m<sup>3</sup>/ton para silagem de milho e 216,6 m<sup>3</sup>/ton para silagem de capim.

A quantidade de silagem de capim utilizada para cada potência também é menor comparada com a silagem de milho, devido também, ao seu menor rendimento de biogás deste último co-substrato em comparação com a silagem de capim. Um fator que determina que as silagens, tanto de milho como de capim elefante, têm rendimento de biogás superior ao esterco bovino, dá-se principalmente devido ao fato de que o esterco de gado bovino é um resíduo da alimentação deste animal, o qual, já assimilou uma fração da energia total que tinha o alimento [35]. As silagens de milho e de capim elefante, são utilizados na pecuária também como rações animais, que, ao serem digeridas por estes, aproveitam uma parcela da energia, tendo que o dejetos (esterco bovino) contém a parcela de energia residual que pode ser aproveitada e transformada em biogás, enquanto que, as silagens ao serem aproveitados diretamente teriam disponível a energia total contida, incrementando a produção de biogás.

Tabela 5.2 – Quantidades de esterco de gado, silagem de milho e silagem de capim utilizados para geração das respectivas potências elétricas

| Potência elétrica [kWe]* | Mono-digestão   | Co-digestão    |                  |        |                |                  |        |
|--------------------------|-----------------|----------------|------------------|--------|----------------|------------------|--------|
|                          | Bovino<br>Total | Bovino-Milho   |                  |        | Bovino-Capim   |                  |        |
|                          |                 | Esterco bovino | Silagem de milho | Total  | Esterco bovino | Silagem de capim | Total  |
| 100                      | 7.812           | 1.987          | 1.325            | 3.311  | 1.857          | 1.238            | 3.095  |
| 200                      | 15.169          | 3.858          | 2.572            | 6.430  | 3.606          | 2.404            | 6.010  |
| 300                      | 22.372          | 5.690          | 3.793            | 9.484  | 5.318          | 3.546            | 8.864  |
| 400                      | 29.480          | 7.498          | 4.999            | 12.496 | 7.008          | 4.672            | 11.680 |
| 500                      | 36.517          | 9.288          | 6.192            | 15.480 | 8.681          | 5.787            | 14.468 |
| 600                      | 43.500          | 11.064         | 7.376            | 18.439 | 10.341         | 6.894            | 17.235 |
| 700                      | 50.438          | 12.828         | 8.552            | 21.380 | 11.990         | 7.994            | 19.984 |
| 800                      | 57.338          | 14.583         | 9.722            | 24.305 | 13.631         | 9.087            | 22.718 |
| 900                      | 64.205          | 16.330         | 10.887           | 27.216 | 15.263         | 10.175           | 25.439 |
| 1.000                    | 71.043          | 18.069         | 12.046           | 30.115 | 16.889         | 11.259           | 28.148 |

\* As outras unidades em toneladas por ano

Na Tabela 5.3 mostram-se as quantidades de cabeças de gado e áreas de milho e capim elefante necessários para geração das respectivas potências elétricas, sendo que, para cenários de mono-digestão com potências de 100 kWe e 1.000 kWe são necessárias 1.033 e 9.397 cabeças de gado bovino respectivamente. Para cenários de co-digestão esterco-milho com potências de 100 kWe e 1.000 kWe são necessárias 263 e 2.390 cabeças de gado bovino respectivamente, além de áreas de 33,11 e 301,15 ha dedicadas para as plantações de milho. Para cenários de co-digestão esterco-capim com potências de 100 kWe e 1.000 kWe são necessárias 246 e 2.234 cabeças de gado bovino respectivamente, além de áreas 32,86 e 298,88 ha dedicadas para as plantações de capim elefante. A diferença, menor quantidade de área, para os cenários de co-digestão bovino-capim, é devido principalmente, às características inerentes da silagem de capim, a qual tem o rendimento de biogás superior à silagem de milho, enquanto as quantidades de cabeça de gado menores, somente estão relacionadas ao aporte de dejetos e biogás de cada cabeça de gado, com valores de produção de esterco bovino de 21 kg por unidade ao dia e produção de biogás de 45 m<sup>3</sup>/ton de esterco.

Tabela 5.3 – Quantidades de cabeças de gado, área de milho e área capim necessários para geração das respectivas potências elétricas

| Potência elétrica [kWe] | Mono-digestão | Co-digestão         |                       |                     |                       |
|-------------------------|---------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
|                         | Bovino        | Bovino-Milho        |                       | Bovino-Capim        |                       |
|                         | Total [N°]    | Esterco bovino [N°] | Silagem de milho [ha] | Esterco bovino [N°] | Silagem de capim [ha] |
| 100                     | 1.033         | 263                 | 33,11                 | 246                 | 32,86                 |
| 200                     | 2.006         | 510                 | 64,30                 | 477                 | 63,82                 |
| 300                     | 2.959         | 753                 | 94,84                 | 704                 | 94,12                 |
| 400                     | 3.899         | 992                 | 124,96                | 927                 | 124,02                |
| 500                     | 4.830         | 1.229               | 154,80                | 1.148               | 153,63                |
| 600                     | 5.754         | 1.463               | 184,39                | 1.368               | 183,00                |
| 700                     | 6.672         | 1.697               | 213,80                | 1.586               | 212,19                |
| 800                     | 7.584         | 1.929               | 243,05                | 1.803               | 241,22                |
| 900                     | 8.493         | 2.160               | 272,16                | 2.019               | 270,11                |
| 1.000                   | 9.397         | 2.390               | 301,15                | 2.234               | 298,88                |

### 5.1.3. Tamanho dos biodigestores

O volume do biodigestor depende basicamente do tipo de substrato, quantidade de produção de biogás por unidade de massa e o tempo de retenção hidráulico, tendo ainda que se ajustar a percentagem de sólidos totais a 12% para conseguir o tipo de digestão úmida.

Pesquisa feitas por Hegde et al (2007, apud Ward et al, 2008) [67], concluem que a digestão de madeira e resíduos vegetais é mais rápida em condições termofílicas de 55°C que em condições mesofílicas de 35°C, tendo obtido valores de TRH de 11 e 27 dias, respetivamente. No entanto, a maioria das usinas de biogás de escala agrícola operam em condições mesofílicas por seus mais baixos custos de instalação e operação [83]. Além disso, a maioria das archaeas metanogênicas são mesofílicas operando entre intervalos de temperaturas de 32-42°C, enquanto só alguns archaeas são termofílicas, operando em temperaturas de 48-55°C, de forma que as archaeas termofílicas são mais sensíveis às variações de temperatura.

O aquecimento do biodigestor é necessário já que as archaeas metanogênicas são sensíveis as alterações de temperaturas de  $\pm 2^\circ\text{C}$ , onde pode ocorrer até 30% de perdas da

produção de biogás [71]. Segundo Chae et al [203], que avaliaram os efeitos do rendimento de biogás na digestão anaeróbia à temperaturas mesofílicas, observou-se que para mudanças bruscas de temperaturas de 35 a 30°C e temperaturas 30 a 32°C, levou à uma diminuição na taxa de produção de biogás. Para a presente avaliação é considerada a temperatura constante mesofílica de 38°C, a qual é mantida constante utilizando o calor residual do sistema CHP. Na Figura 5.3, é possível verificar como o tempo de retenção hidráulica varia em função da temperatura, tendo que para as condições de operação deste trabalho, em temperaturas mesofílicas de 38°C, o tempo de retenção hidráulica calculado foi de 20,38 dias.

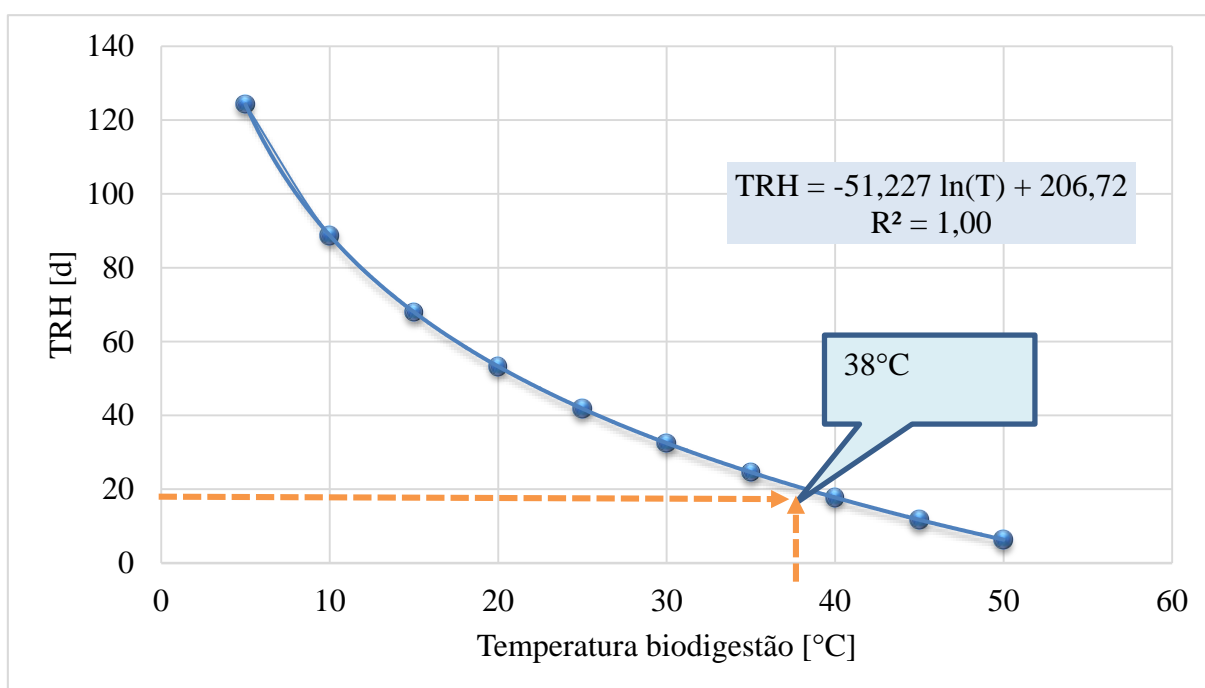


Figura 5.3 – Variação do TRH em função da temperatura de trabalho do biodigestor

Na Tabela 5.4, apresentam-se os detalhes do dimensionamento dos principais componentes do biodigestor, sendo que os volumes do biodigestor foram determinados tendo em consideração a temperatura de aquecimento do biodigestor de 38 °C (condições mesófilas) e o fator de projeto, tendo que os volumes do biodigestor para a mono-digestão de esterco bovino são 2,30 vezes maiores que os volumes dos biodigestores para a co-digestão de bovino-milho e 2,32 vezes maiores que os volumes dos biodigestores para a co-digestão de bovino-capim, como é mostrado na Figura 5.4, enquanto os volumes do biodigestor para os sistemas de co-digestão bovino-milho são 0,93% maiores do que os sistemas de co-digestão bovino-capim.

Tabela 5.4 – Tamanho dos principais componentes do biodigestor para as diferentes potências avaliadas

| Sistema        | Componentes          | Potência elétricas [kWe]* |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------|----------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                |                      | 100                       | 200   | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1.000 |
| Esterco bovino | Tanque de preparação | 454                       | 882   | 1.301 | 1.715 | 2.124 | 2.530 | 2.933 | 3.335 | 3.734 | 4.132 |
|                | Silo                 | -                         | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
|                | Biodigestor          | 926                       | 1.798 | 2.651 | 3.494 | 4.328 | 5.155 | 5.978 | 6.795 | 7.609 | 8.420 |
|                | Gasômetro            | 926                       | 1.798 | 2.651 | 3.494 | 4.328 | 5.155 | 5.978 | 6.795 | 7.609 | 8.420 |
|                | Tanque de digestato  | 239                       | 463   | 684   | 901   | 1.116 | 1.329 | 1.541 | 1.752 | 1.962 | 2.171 |
| Bovino - Milho | Tanque de preparação | 198                       | 384   | 567   | 747   | 925   | 1.102 | 1.278 | 1.453 | 1.627 | 1.800 |
|                | Silo                 | 315                       | 612   | 903   | 1.190 | 1.474 | 1.756 | 2.036 | 2.315 | 2.592 | 2.868 |
|                | Biodigestor          | 497                       | 965   | 1.424 | 1.876 | 2.324 | 2.768 | 3.210 | 3.649 | 4.086 | 4.521 |
|                | Gasômetro            | 497                       | 965   | 1.424 | 1.876 | 2.324 | 2.768 | 3.210 | 3.649 | 4.086 | 4.521 |
|                | Tanque de digestato  | 101                       | 196   | 290   | 382   | 473   | 563   | 653   | 743   | 832   | 920   |
| Bovino - Capim | Tanque de preparação | 196                       | 381   | 562   | 740   | 917   | 1.092 | 1.266 | 1.440 | 1.612 | 1.784 |
|                | Silo                 | 295                       | 572   | 844   | 1.112 | 1.378 | 1.641 | 1.903 | 2.164 | 2.423 | 2.681 |
|                | Biodigestor          | 487                       | 946   | 1.395 | 1.839 | 2.278 | 2.713 | 3.146 | 3.576 | 4.005 | 4.431 |
|                | Gasômetro            | 487                       | 946   | 1.395 | 1.839 | 2.278 | 2.713 | 3.146 | 3.576 | 4.005 | 4.431 |
|                | Tanque de digestato  | 95                        | 184   | 271   | 357   | 442   | 527   | 611   | 694   | 777   | 860   |

\* As outras unidades em metros cúbicos

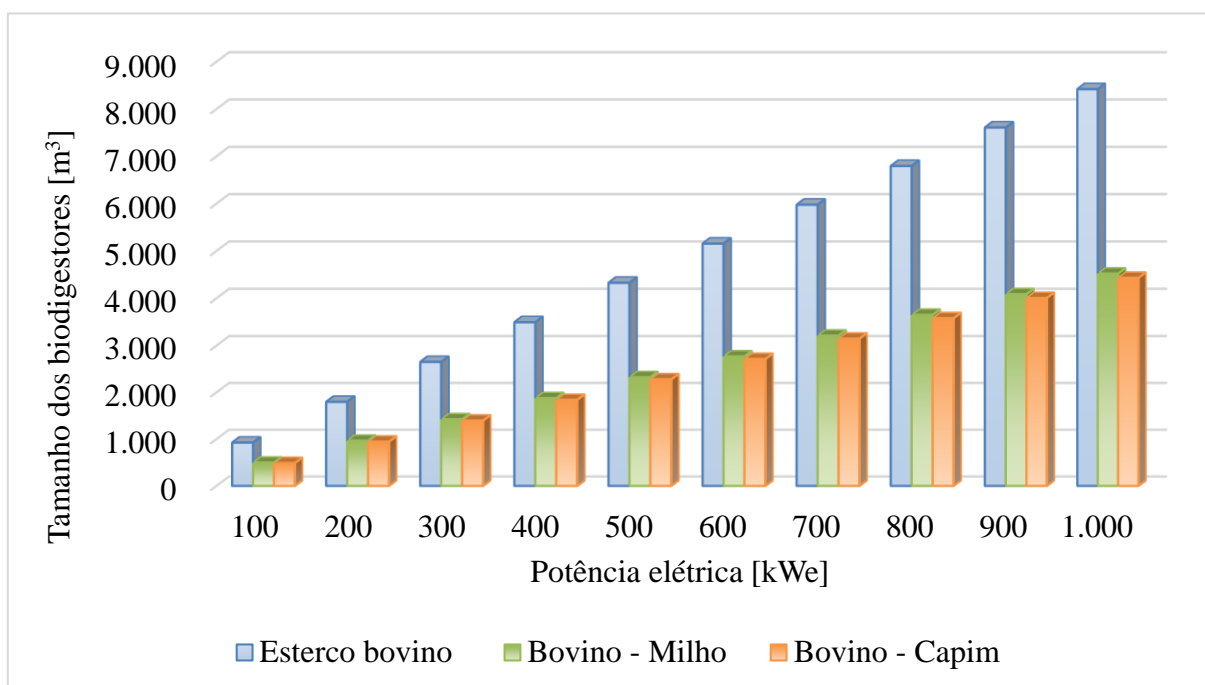


Figura 5.4 – Volumes do biodigestor para os sistemas de mono-digestão esterco bovino e co-digestão bovino-milho e bovino-capim para as diferentes potências avaliadas

### 5.1.4. Gasto energético

O gasto de energia elétrica do sistema de digestão anaeróbio, dá-se principalmente devido à agitação, sistema de bombeamento, sistema de transporte de silagem ao biodigestor (correia transportadora) e dessulfurizador; enquanto o gasto energético do calor gerado pelo sistema CHP, é principalmente devido ao aquecimento do biodigestor e as perdas de calor. Os gastos de energia elétrica e calor dependem da quantidade de substrato ou mistura utilizadas.

Na Figura 5.5, apresentam-se os consumos de energia elétrica com relação ao total de energia elétrica produzida, tendo consumos de 10,7% e 9,4% da eletricidade gerada em sistemas de mono-digestão de esterco bovino, para potências de geração elétrica de 100 e 1.000 kWe, respetivamente; 6,8% e 5,8% da eletricidade gerada em sistemas de co-digestão esterco-milho, para potências de geração elétricas de 100 e 1.000 kWe, respetivamente; e 6,6% e 5,7% da eletricidade gerada em sistemas de co-digestão esterco-capim, para potências de geração elétrica de 100 e 1.000 kWe, respetivamente.

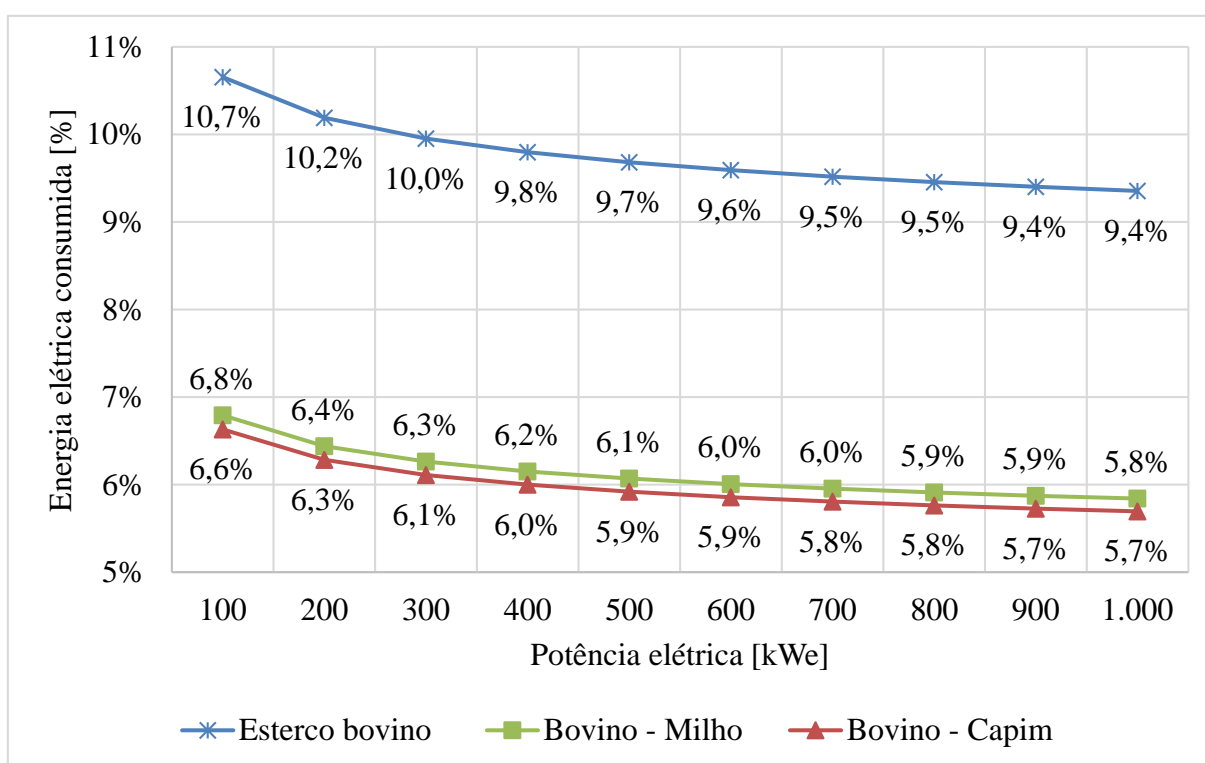


Figura 5.5 – Consumo de energia elétrica com referência do total de energia elétrica produzida pelo sistema CHP

Na Figura 5.6, apresentam-se os consumos de calor com relação ao total de calor produzido, tendo consumos de 22,7% e 23,8% do calor produzido em sistemas de mono-digestão de esterco bovino, para potências de geração elétrica de 100 e 1.000 kWe, respetivamente; 12,5% e 13,0% do calor produzido em sistemas de co-digestão esterco-milho para potências de geração elétricas de 100 e 1.000 kWe, respetivamente; e 12,2% e 12,7% do calor produzido em sistemas de co-digestão esterco-capim, para potências de geração elétrica de 100 e 1.000 kWe, respetivamente.

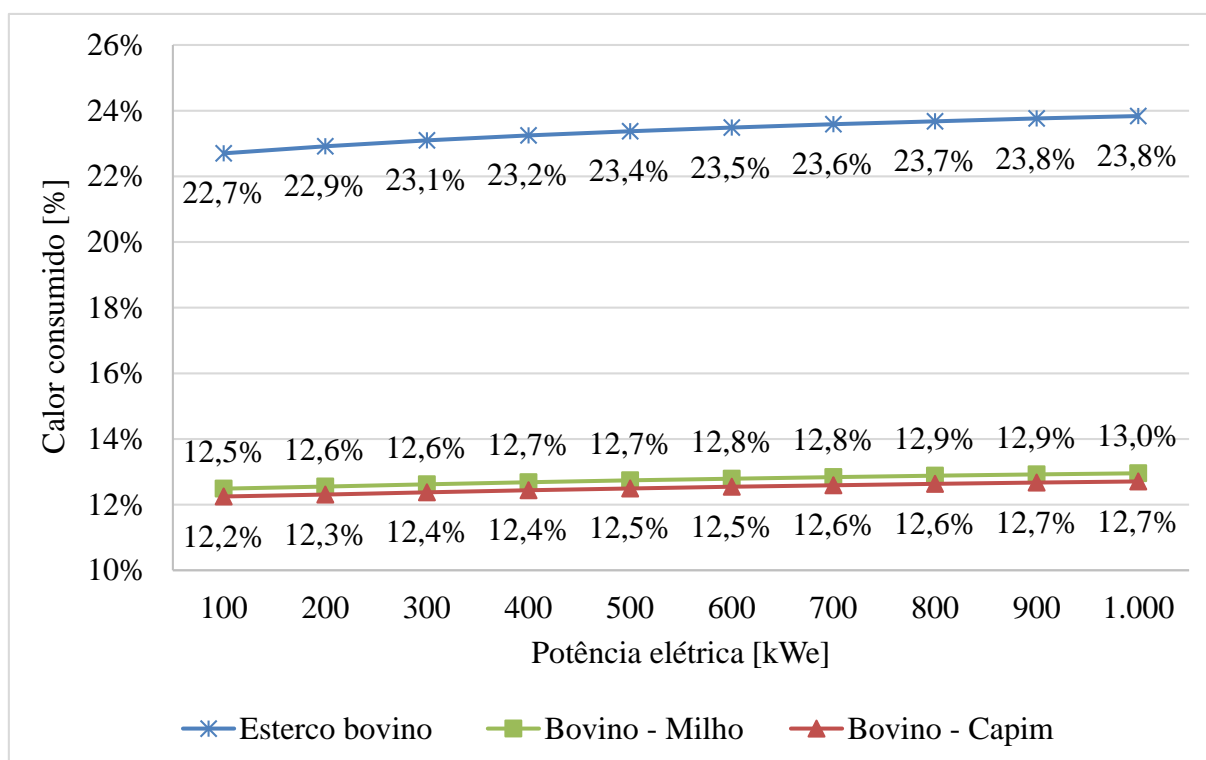


Figura 5.6 – Consumo de calor com referência do total de calor produzida pelo sistema CHP

A Tabela 5.5 mostra os detalhes dos consumos energéticos, tanto de calor e energia, para os diferentes sistemas de mono-digestão esterco bovino e co-digestão bovino-milho e bovino-capim, para as diferentes potências elétricas avaliadas. O maior gasto, tanto elétrico como de calor, dá-se nos sistemas de mono-digestão de esterco-bovino, devido ao fato que estes sistemas precisam de maior energia por sua maior demanda de substrato em comparação dos outros sistemas de co-digestão. Os consumos de eletricidade para estes sistemas seriam de 1,59 vezes maior que os sistemas de co-digestão esterco-milho e 1,63 vezes maior que os sistemas de co-digestão esterco-capim, enquanto o consumo de calor para os sistemas de mono-digestão de

esterco bovino seria de 1,83 vezes maior que os sistemas de co-digestão esterco-milho e 1,87 vezes maior que os sistemas de co-digestão esterco-capim.

Tabela 5.5 – Consumos de energia dos equipamentos dos sistemas de digestão anaeróbia para as diferentes potências avaliadas

| Sistema        | Componentes                       | Potência elétricas [kWe]* |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|----------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                |                                   | 100                       | 200          | 300          | 400          | 500          | 600          | 700          | 800          | 900          | 1.000        |
| Esterco bovino | Agitação do biodigestor           | 80                        | 155          | 229          | 302          | 374          | 445          | 516          | 587          | 657          | 727          |
|                | Sistema de bombeamento            | 1,0                       | 2,0          | 2,9          | 3,8          | 4,8          | 5,7          | 6,6          | 7,5          | 8,4          | 9,3          |
|                | Transportadores de silo           | 0,0                       | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0          |
|                | Dessulfurizador                   | 4,2                       | 5,7          | 6,9          | 7,8          | 8,6          | 9,3          | 10,0         | 10,6         | 11,1         | 11,6         |
|                | <b>Total de energia consumida</b> | <b>85</b>                 | <b>163</b>   | <b>239</b>   | <b>313</b>   | <b>387</b>   | <b>460</b>   | <b>533</b>   | <b>605</b>   | <b>677</b>   | <b>748</b>   |
|                | Aquecimento dos substratos        | 198                       | 384          | 567          | 747          | 925          | 1.102        | 1.277        | 1.452        | 1.626        | 1.799        |
|                | Perdas de calor                   | 23,4                      | 36,4         | 47,2         | 56,7         | 65,4         | 73,5         | 81,2         | 88,4         | 95,3         | 102,0        |
|                | <b>Total de calor consumido</b>   | <b>221</b>                | <b>421</b>   | <b>614</b>   | <b>803</b>   | <b>990</b>   | <b>1.175</b> | <b>1.358</b> | <b>1.540</b> | <b>1.721</b> | <b>1.901</b> |
|                | <b>Eletricidade disponível</b>    | <b>715</b>                | <b>1.437</b> | <b>2.161</b> | <b>2.887</b> | <b>3.613</b> | <b>4.340</b> | <b>5.067</b> | <b>5.795</b> | <b>6.523</b> | <b>7.252</b> |
|                | <b>Calor disponível</b>           | <b>753</b>                | <b>1.415</b> | <b>2.044</b> | <b>2.652</b> | <b>3.246</b> | <b>3.828</b> | <b>4.401</b> | <b>4.965</b> | <b>5.522</b> | <b>6.074</b> |
| Bovino - Milho | Agitação do biodigestor           | 43                        | 83           | 123          | 162          | 201          | 239          | 277          | 315          | 353          | 391          |
|                | Sistema de bombeamento            | 0,5                       | 1,0          | 1,5          | 2,0          | 2,4          | 2,9          | 3,4          | 3,8          | 4,3          | 4,8          |
|                | Transportadores de silo           | 6,6                       | 12,9         | 19,0         | 25,0         | 31,0         | 36,9         | 42,8         | 48,6         | 54,4         | 60,2         |
|                | Dessulfurizador                   | 4,2                       | 5,7          | 6,9          | 7,8          | 8,6          | 9,3          | 10,0         | 10,6         | 11,1         | 11,6         |
|                | <b>Total de energia consumida</b> | <b>54</b>                 | <b>103</b>   | <b>150</b>   | <b>197</b>   | <b>243</b>   | <b>288</b>   | <b>333</b>   | <b>378</b>   | <b>423</b>   | <b>467</b>   |
|                | Aquecimento dos substratos        | 106                       | 206          | 304          | 401          | 497          | 591          | 686          | 780          | 873          | 966          |
|                | Perdas de calor                   | 15,5                      | 24,1         | 31,2         | 37,5         | 43,2         | 48,6         | 53,6         | 58,4         | 63,0         | 67,4         |
|                | <b>Total de calor consumido</b>   | <b>122</b>                | <b>230</b>   | <b>335</b>   | <b>438</b>   | <b>540</b>   | <b>640</b>   | <b>739</b>   | <b>838</b>   | <b>936</b>   | <b>1.033</b> |
|                | <b>Eletricidade disponível</b>    | <b>746</b>                | <b>1.497</b> | <b>2.250</b> | <b>3.003</b> | <b>3.757</b> | <b>4.512</b> | <b>5.267</b> | <b>6.022</b> | <b>6.777</b> | <b>7.533</b> |
|                | <b>Calor disponível</b>           | <b>853</b>                | <b>1.605</b> | <b>2.322</b> | <b>3.017</b> | <b>3.697</b> | <b>4.363</b> | <b>5.020</b> | <b>5.668</b> | <b>6.308</b> | <b>6.941</b> |
| Bovino - Capim | Agitação do biodigestor           | 42                        | 82           | 121          | 159          | 197          | 234          | 272          | 309          | 346          | 383          |
|                | Sistema de bombeamento            | 0,5                       | 1,0          | 1,5          | 2,0          | 2,5          | 2,9          | 3,4          | 3,8          | 4,3          | 4,8          |
|                | Transportadores de silo           | 6,2                       | 12,0         | 17,7         | 23,4         | 28,9         | 34,5         | 40,0         | 45,4         | 50,9         | 56,3         |
|                | Dessulfurizador                   | 4,2                       | 5,7          | 6,9          | 7,8          | 8,6          | 9,3          | 10,0         | 10,6         | 11,1         | 11,6         |
|                | <b>Total de energia consumida</b> | <b>53</b>                 | <b>101</b>   | <b>147</b>   | <b>192</b>   | <b>237</b>   | <b>281</b>   | <b>325</b>   | <b>369</b>   | <b>412</b>   | <b>456</b>   |
|                | Aquecimento dos substratos        | 104                       | 202          | 298          | 393          | 487          | 580          | 672          | 764          | 856          | 947          |
|                | Perdas de calor                   | 15,3                      | 23,7         | 30,8         | 37,0         | 42,7         | 47,9         | 52,9         | 57,6         | 62,1         | 66,5         |
|                | <b>Total de calor consumido</b>   | <b>119</b>                | <b>226</b>   | <b>329</b>   | <b>430</b>   | <b>529</b>   | <b>628</b>   | <b>725</b>   | <b>822</b>   | <b>918</b>   | <b>1.013</b> |
|                | <b>Eletricidade disponível</b>    | <b>747</b>                | <b>1.499</b> | <b>2.253</b> | <b>3.008</b> | <b>3.763</b> | <b>4.519</b> | <b>5.275</b> | <b>6.031</b> | <b>6.788</b> | <b>7.544</b> |
|                | <b>Calor disponível</b>           | <b>855</b>                | <b>1.609</b> | <b>2.329</b> | <b>3.026</b> | <b>3.707</b> | <b>4.376</b> | <b>5.034</b> | <b>5.684</b> | <b>6.326</b> | <b>6.961</b> |

\* As outras unidades em MWh/a

A Tabela 5.6, Tabela 5.7 e Tabela 5.8, mostram um resumo dos balanços de massa e as características principais dos sistemas de mono-digestão esterco bovino, co-digestão esterco-milho e co-digestão esterco-capim, sendo que a principal características que determina o desempenho do processo de digestão anaeróbia são: a Taxa de Carga Orgânica (*Organic Loading Rate* “OLR”), que expressa a capacidade de conversão biológica do sistema de digestão anaeróbia. O parâmetro OLR mede a quantidade de substrato ou mistura de substratos ingressados ao biodigestor por volume ( $m^3$ ) de biodigestor por tempo (dia)  $kg\ SV/m_{BD}^3.dia$  [204]. As usinas de digestão anaeróbia de pequeno porte têm OLR inferiores a 1,5 como as usinas de biogás para uso doméstico, construídas geralmente nos países em desenvolvimento [112,127], enquanto as usinas de médio porte têm valores de OLR nos intervalos de 1,5-5,0 e as usinas de grande porte, têm valores de OLR superiores a 5,0 [71].

A taxa de carga orgânica calculada para os sistemas de mono-digestão de esterco bovino é de  $3,77\ kg\ SV/m_{BD}^3.dia$ , enquanto para os sistemas de co-digestão de esterco-milho e esterco-capim são de  $4,15\ kg\ SV/m_{BD}^3.dia$  e  $4,05\ kg\ SV/m_{BD}^3.dia$ , respetivamente. Estes valores de OLR são superiores em comparação com os valores de OLR das usinas pequeno porte, as quais têm alta diluição,  $ST < 5\%$ , e TRH superiores a 50 dias por não ter um sistema de aquecimento que permita reduzir o tamanho do biodigestor [81]., a diferença dos biodigestores projetados para condições ora estudadas que com aquecimento constante, permite garantir a produção de biogás e reduzir o volume do biodigestor.

Outro indicador importante de desempenho que pode fornecer uma projeção da quantidade de produção de biogás em relação ao tamanho do biodigestor é a Taxa de Produção de Biogás (*Biogas Production Rates*), que expressa a quantidade volumétrica de biogás produzida por volume ( $m^3$ ) de biodigestor por tempo (dia)  $m_{biogás}^3/m_{BD}^3.dia$ . A taxa de produção de biogás calculada para os sistemas de mono-digestão de esterco bovino é de  $1,06\ m_{biogás}^3/m_{BD}^3.dia$ , enquanto para os sistemas de co-digestão de esterco-milho e esterco-capim são de  $1,97\ m_{biogás}^3/m_{BD}^3.dia$  e  $2,01\ m_{biogás}^3/m_{BD}^3.dia$ , respetivamente.







## 5.2. Análise econômica

Os estudos da análise econômica, levaram em consideração os resultados dos balanços de massa, energia e dimensionamentos dos equipamentos da avaliação técnica. Além disso, nesta análise econômica determinou-se os custos de transporte necessários para os cenários descentralizado com co-digestão e centralizado com co-digestão.

### 5.2.1. Distância e transporte

A Figura 5.7, mostra os resultados da análise para os diferentes tipos de transportes de biomassa até a usina de biogás, onde o custo de transporte em USD/ton depende da distância percorrida, sendo que o transporte “treminhão”, carga 45 toneladas por viagem, é o transporte que têm menores custos comprado com “rodotrem”, que carga 65 toneladas por viagem, devido principalmente aos menores custos fixos e variáveis. Por outro lado, o transporte “Romeu e Julieta”, que carga 25 toneladas por viagem, é desconsiderado para o transporte de silagens, já que este tipo de transporte somente transporta biomassa inteira, sendo necessário para o caso das silagens o deslocamento de biomassa picada, a qual, será utilizada posteriormente como co-substrato na digestão anaeróbia.

A partir da análise feita determinou-se as equações 5.1, 5.2 e 5.3, a qual se utilizou para obter os custos de transporte por distância (km) percorrida. O custos de transporte dos diferentes veículos, para distâncias de 20 km de deslocamento, são de 1,18 USD/ton para romeu e Julieta, 1,00 USD/ton, para o Treminhão e 1,15 USD/ton, para o Rodotrem, os quais são similares aos valores obtidos por Lazzarini [186], de 1,49 USD/ton para uma distância percorrida de 20 km. Os custos de transporte para o Treminhão para as diferentes distâncias de transporte para sistemas de digestão anaeróbia centralizada, são de 0,43 USD/ton para 5 km, 0,62 USD/ton para 10 km, 0,81 USD/ton para 15 km, 1,00 USD/ton para 20 km, 1,19 USD/ton para 25 km e 1,38 USD/ton para 30 km.

$$\text{Romeu e Julieta} \quad C_t = 0,0508 \times d + 0,1674 \quad (5.1)$$

$$\text{Treminhão} \quad C_t = 0,0380 \times d + 0,2409 \quad (5.2)$$

$$\text{Rodotrem} \quad C_t = 0,0391 \times d + 0,3655 \quad (5.3)$$

Onde:

$C_t$  = custo de transporte por tonelada [USD/ton];

$d$  = distância de transporte de co-substrato [km]

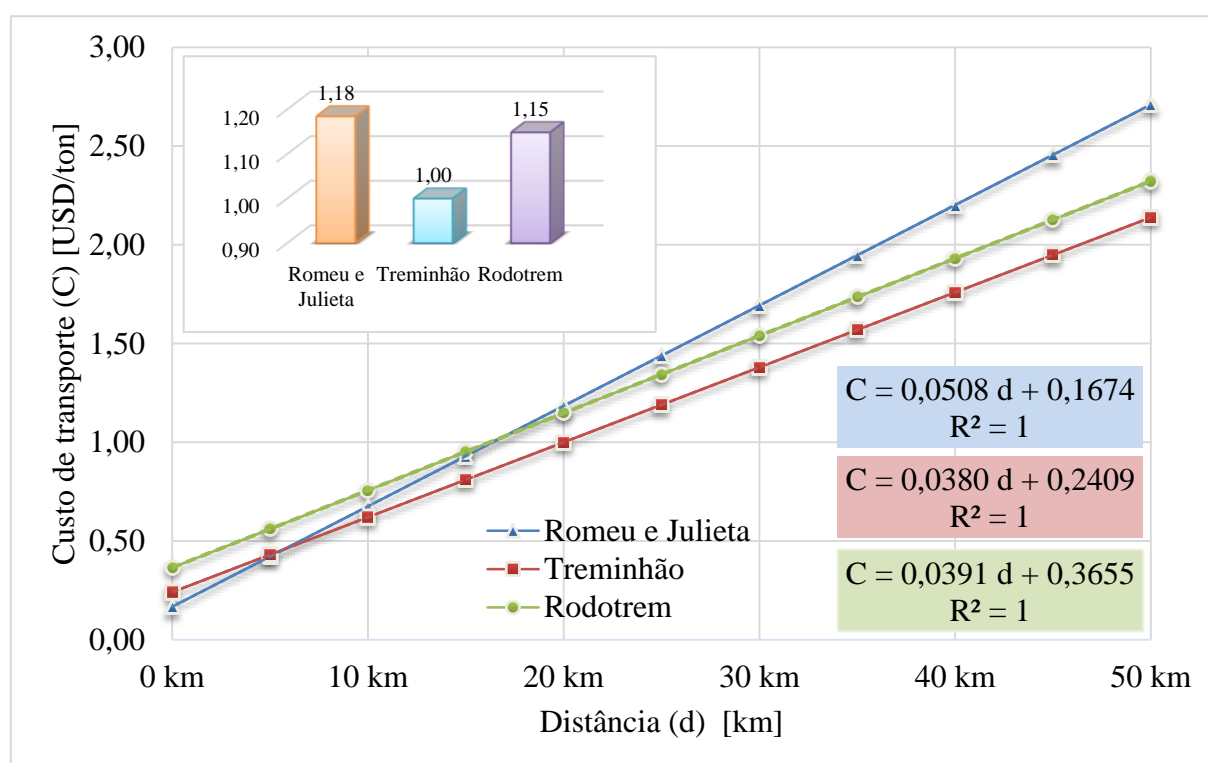


Figura 5.7 – Custos do transporte de biomassa em USD/ton para algumas opções.

A Tabela 5.9 mostra os resultados das avaliações feitas para as distâncias percorridas referentes aos cálculos das diferentes potências, dos sistemas de digestão anaeróbia descentralizadas, tendo em consideração que as plantações, tanto de milho como de capim elefante, encontram-se ao redor da usina, formando um círculo. Os resultados mostram que,

para sistemas co-digestão descentraliza bovino-milho, as distâncias médias são de 0,46 km a 1,38 km para potências elétricas de 100 e 1.000 kWe, respectivamente, enquanto para sistemas co-digestão descentraliza bovino-capim, as distâncias médias são de 0,45 km a 1,37 km, para potências elétricas de 100 e 1.000 kWe, respectivamente.

Tabela 5.9 – Distâncias percorridas para sistemas de e co-digestão descentralizada bovino-milho e co-digestão descentralizada bovino-capim

| Potência elétrica [kWe] | Co-digestão bovino-milho |                      |                               | Co-digestão bovino-capim |                      |                               |
|-------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------------|
|                         | Área [ha]                | Distância média [km] | Custo de transporte [USD/ton] | Área [ha]                | Distância média [km] | Custo de transporte [USD/ton] |
| 100                     | 33,11                    | 0,46                 | 0,258                         | 32,86                    | 0,45                 | 0,258                         |
| 200                     | 64,30                    | 0,64                 | 0,265                         | 63,82                    | 0,63                 | 0,265                         |
| 300                     | 94,84                    | 0,77                 | 0,270                         | 94,12                    | 0,77                 | 0,270                         |
| 400                     | 124,96                   | 0,89                 | 0,275                         | 124,02                   | 0,88                 | 0,274                         |
| 5000                    | 154,80                   | 0,99                 | 0,278                         | 153,63                   | 0,98                 | 0,278                         |
| 600                     | 184,39                   | 1,08                 | 0,282                         | 183,00                   | 1,07                 | 0,282                         |
| 700                     | 213,80                   | 1,16                 | 0,285                         | 212,19                   | 1,16                 | 0,285                         |
| 800                     | 243,05                   | 1,24                 | 0,288                         | 241,22                   | 1,23                 | 0,288                         |
| 900                     | 272,16                   | 1,31                 | 0,291                         | 270,11                   | 1,30                 | 0,290                         |
| 1.000                   | 301,15                   | 1,38                 | 0,293                         | 298,88                   | 1,37                 | 0,293                         |

### 5.2.2. Custo de investimento e receitas obtidas

A Tabela 5.10 mostra os resultados dos cálculos de investimento total para os diferentes sistemas avaliados, sendo que os sistemas de co-digestão bovino-capim, têm os menores custos de investimento, devido aos maiores rendimentos de biogás por tonelada de silagem de capim, o qual leva a ter um biodigestor de menor volume, reduzindo os custos de investimento. Os custos de investimento total representam os custos referentes ao biodigestor, moto-gerador, tanque de preparação de esterco bovino, cobertura para o silo (armazenagem de silagem), sistema de bombeamento, gasômetro (armazenamento de biogás), dessulfurizados (limpeza de biogás), tanque de armazenamento de digestato, queimador e a conexão à rede elétrica.

O custo de investimento total para potências de geração elétrica de 100 kWe são de 846.247 USD para sistemas de mono-digestão bovino, 703.383 USD para sistemas de co-

digestão bovino-milho e 697.719 USD para sistemas de co-digestão bovino-capim, enquanto para potências de geração elétricas de 1.000 kWe os custos de investimento total são de 3.224.424 USD para sistemas de mono-digestão bovino, 2.601.979 USD para sistemas de co-digestão bovino-milho e 2.577.300 USD para sistemas de co-digestão bovino-capim. O custo de investimento do moto-gerador CHP para potências de geração elétrica de 100 kWe é de 2.238 USD/kWe, enquanto, para potências de geração elétrica de 1.000 kWe o custo do moto-gerador é de 1.039 USD/kWe. O custo do moto-gerador CHP Otto gás tem relação com os custos padrão proporcionado por Deublein et al [71], segundo qual os custos dos sistemas CHP encontram-se nos intervalos de 500-1500 USD/kWe.

Tabela 5.10 – Custos total de investimento dos diferentes sistemas de mono-digestão esterco bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim e custo de investimento de moto gerador CHP otto gás para as diferentes potências avaliadas

| Potência elétrica [kWe] | Mono-digestão esterco bovino [USD] | Co-digestão bovino-milho [USD] | Co-digestão bovino-capim [USD] | Moto gerador CHP otto gás [USD] |
|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 100                     | 846.247                            | 703.383                        | 697.719                        | 223.790                         |
| 200                     | 1.241.634                          | 1.019.275                      | 1.010.459                      | 355.245                         |
| 300                     | 1.567.899                          | 1.279.787                      | 1.268.364                      | 465.502                         |
| 400                     | 1.856.290                          | 1.510.004                      | 1.496.274                      | 563.916                         |
| 500                     | 2.119.522                          | 1.720.114                      | 1.704.278                      | 654.366                         |
| 600                     | 2.364.345                          | 1.915.519                      | 1.897.724                      | 738.939                         |
| 700                     | 2.594.876                          | 2.099.513                      | 2.079.872                      | 818.916                         |
| 800                     | 2.813.856                          | 2.274.287                      | 2.252.894                      | 895.160                         |
| 900                     | 3.023.226                          | 2.441.394                      | 2.418.325                      | 968.283                         |
| 1.000                   | 3.224.424                          | 2.601.979                      | 2.577.300                      | 1.038.742                       |

A partir da análise feita se determinou o equacionamento, que pode ser utilizado para determinar os custos de investimento total dos sistemas de digestão anaeróbia, em função da potência de geração, utilizando mono-substratos de esterco de gado (equação 5.4), sistemas de co-digestão com 60% de esterco de gado bovino e 40% silagem de milho (equação 5.5) e, sistemas de co-digestão com 60% de esterco de gado bovino e 40% silagem de capim (equação 5.6). Além disso, com a equação 5.7, pode-se determinar o custo de investimento do moto-gerador CHP para diferentes potências de geração elétrica. Walla [52], também determinou uma função de custo  $I = 101.522 + 3.500\omega$ , para calcular o custo em função das potências das

usinas de biogás; no entanto, os custos obtidos a partir da equação fornecida por Walla [52], foram para outras condições e os valores de investimento são fornecidos em euros.

$$\text{Mono-digestão esterco bovino} \quad I_1 = 40.969 \times \omega^{0,6267} + 109.617 \quad (5.4)$$

$$\text{Co-digestão bovino-milho} \quad I_2 = 33.474 \times \omega^{0,6236} + 109.617 \quad (5.5)$$

$$\text{Co-digestão bovino-capim} \quad I_3 = 33.177 \times \omega^{0,6234} + 109.617 \quad (5.6)$$

$$\text{Moto gerador CHP otto gás} \quad I_{CHP} = 10.387 \times \omega^{0,6667} \quad (5.7)$$

Onde:

$I$  = custo total investimento do sistema de digestão anaeróbia [USD];

$I_{CHP}$  = custo de investimento do moto gerador CHP otto gás [USD];

$\omega$  = potência elétrica do sistema [kWe]

As receitas obtidas, para os diferentes sistemas, são principalmente pela venda de energia, venda de Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) e venda da parte sólida do fertilizante (vide Figura 5.8). Para sistemas de mono-digestão bovino com potências nos intervalos de 100 -1.000 kWe, as receitas obtidas são compostas em média de 60% devido a venda de energia elétrica, 16% devido à redução certificada de emissões e 24% referentes a da fração sólida do digestato vendido. Para sistemas de co-digestão bovino-milho, com potências nos intervalos de 100 -1.000 kWe, as receitas obtidas são compostas em média de 71% pela venda de energia elétrica, 18% pela venda de redução certificada de emissões e 11% pela venda da fração sólida do digestato. Valores similares se obtém para sistemas de co-digestão bovino-capim com potências nos intervalos de 100 -1.000 kWe, sendo que as receitas obtidas correspondem em média de 72% devido à venda de energia elétrica, 18% devido à venda de redução certificada de emissões e 10% pela venda da fração sólida do digestato.

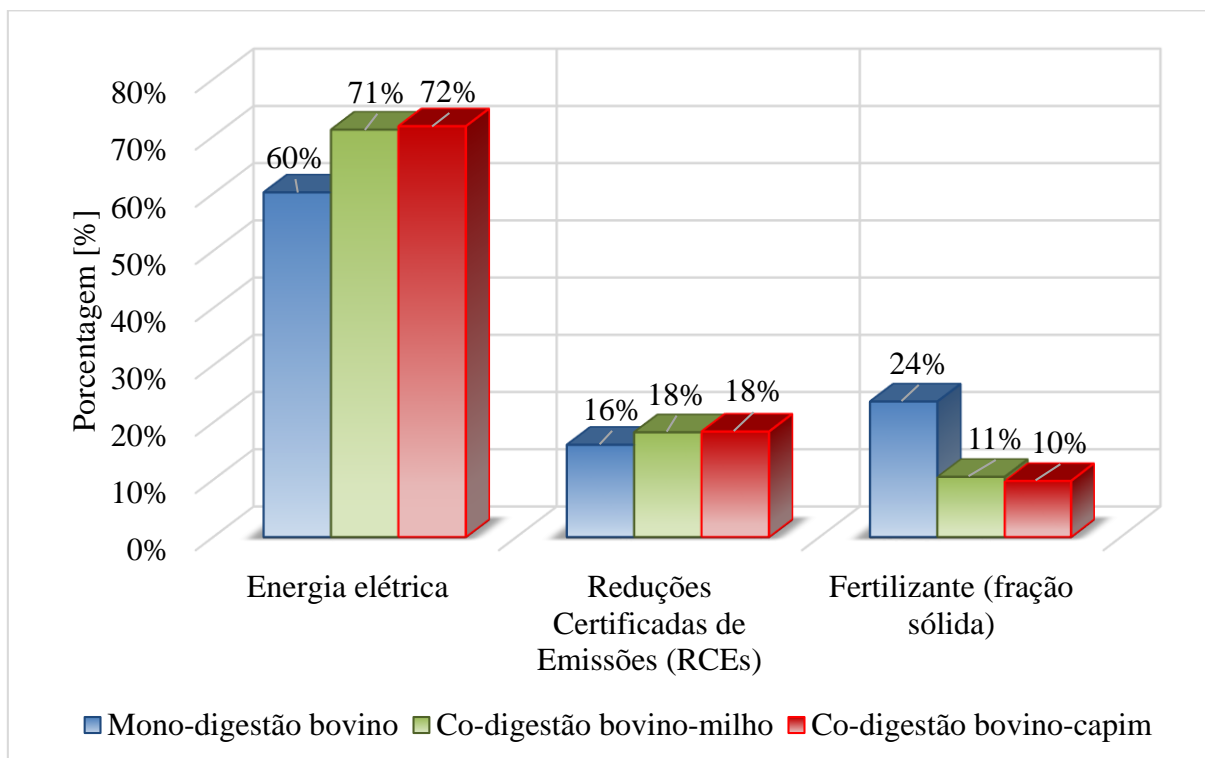


Figura 5.8 – Receitas obtidas dos sistemas mono-digestão bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim

### 5.2.3. Análise de VPL, TIR e TRC

A Figura 5.9 mostra a análise econômica, com o valor do VPL obtido para os sistemas descentralizados de mono-digestão bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim, sendo que, os sistemas descentralizados de co-digestão não apresentam viabilidade econômica para as potências avaliadas entre 100 e 1.000 kWe. Na análise feita para os sistemas descentralizados de mono-digestão de esterco bovino mostra-se a viabilidade econômica para potências superiores a 740 kWe. Os resultados mostram que, para os sistemas descentralizados de mono-digestão de esterco bovino, obtém-se valores de VPL de 124.555 USD, de TIR de 15,80% e de TRC de 16,47 anos para potências de 800 kWe, VPL de 346.856 USD, TIR de 17,04% e TRC de 13,25 anos para potências de 900 kWe, e VPL de 580.738 USD, TIR de 18,19% e TRC de 11,39 anos para potências de 1.000 kWe. Estes valores são indicativos de que usinas de biogás em sistemas de mono-digestão utilizando esterco bovino tem maior

viabilidade econômica na medida que o tamanho da usina se incrementa, devido à economia de escala.

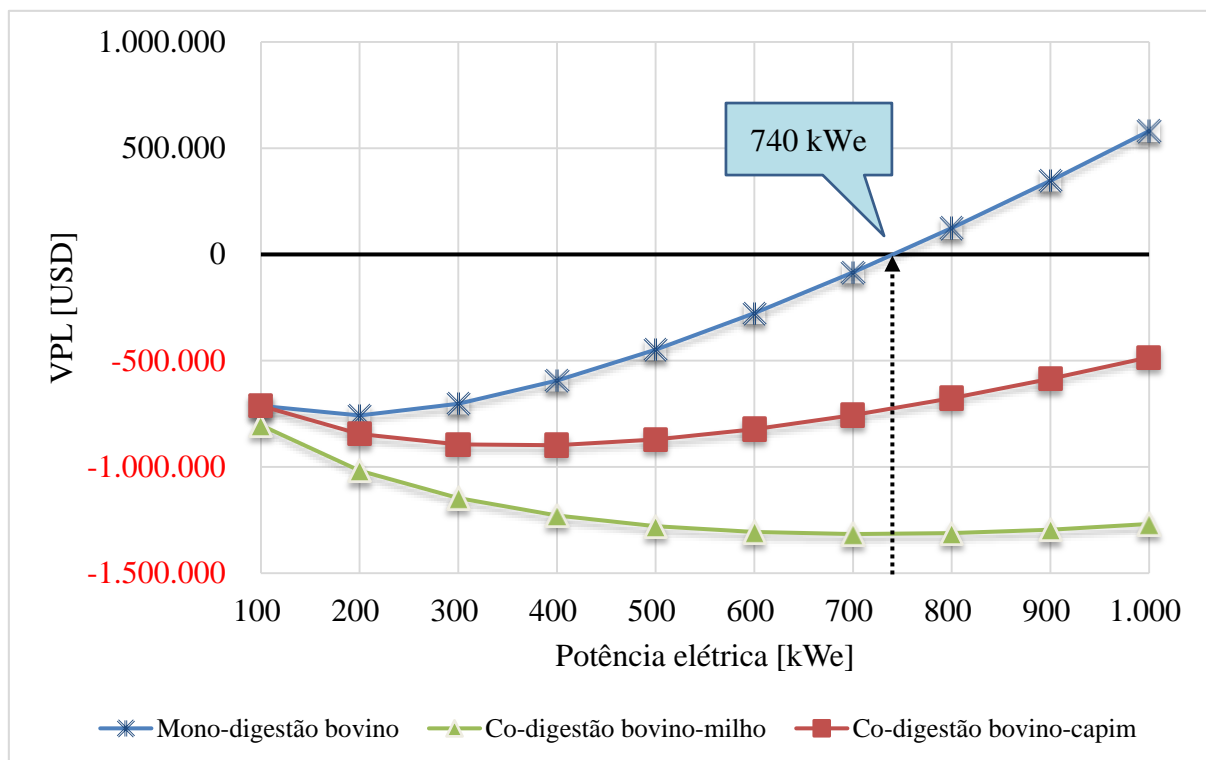


Figura 5.9 – Análise econômica dos sistemas descentralizados de mono-digestão bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim

Na Figura 5.10 e Figura 5.11 são mostradas as avaliações feitas dos sistemas centralizados de co-digestão esterco-milho e co-digestão esterco-capim, para as diferentes distâncias avaliadas, sendo que estes sistemas não são viáveis para as potências avaliadas entre os intervalos de 100 até 1.000 kWe, tendo estes sistemas uma tendência a ter viabilidade econômica para potências maiores. As distâncias avaliadas entre 5-30 km de deslocamento não têm um impacto significativo no VPL, já que elas representam entre 1 -5,4% do valor médio do VPL. No entanto, em outras condições como na Dinamarca, para sistemas de co-digestão, a distância ideal de deslocamento da biomassa dedicada é de 7,5 km [157], enquanto que, avaliações feitas na Holanda por Gebrezgabher [161], mostram distâncias máximas de deslocamento entre 15-25 km, para misturas de substratos (dejetos suínos, aves, milho, resíduos de alimentos e bolbos de flores). Yabe [205], mostra resultados similares, tendo distâncias máximas para o deslocamento de matérias-primas até uma usina centralizada de 10 km.

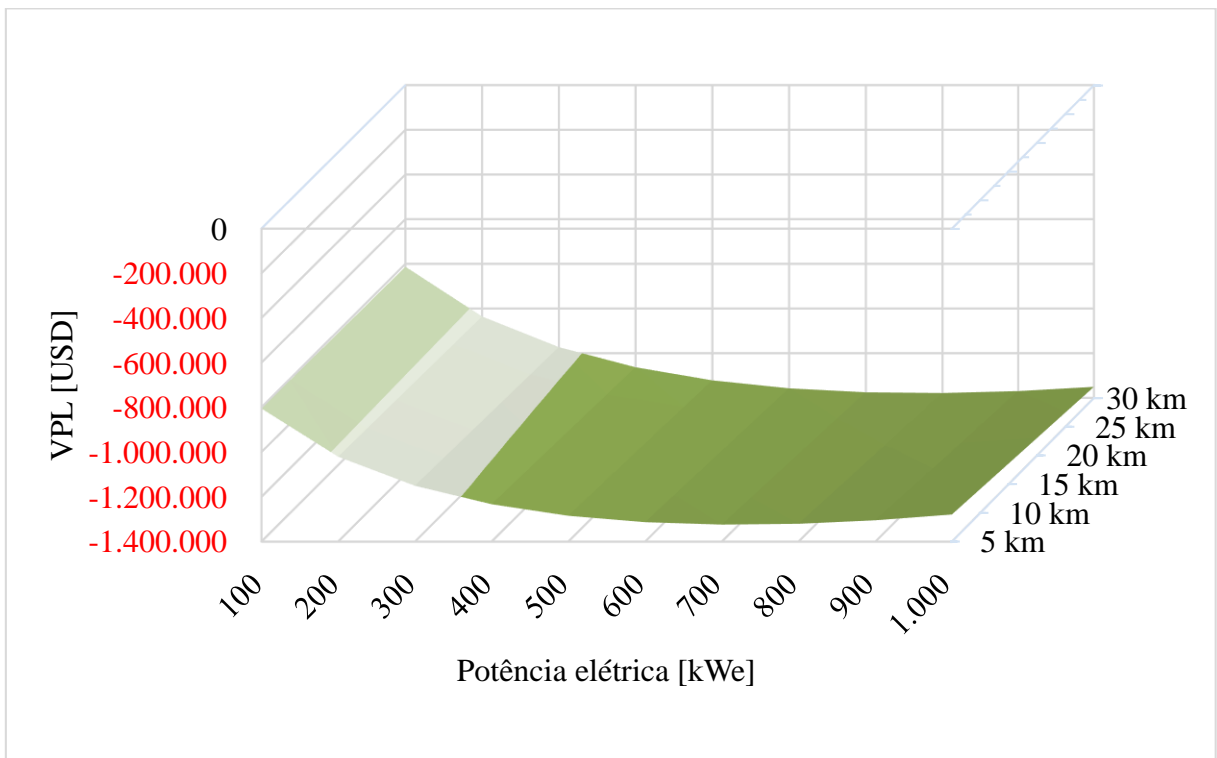


Figura 5.10 – Análise econômica dos sistemas centralizados de co-digestão bovino-milho

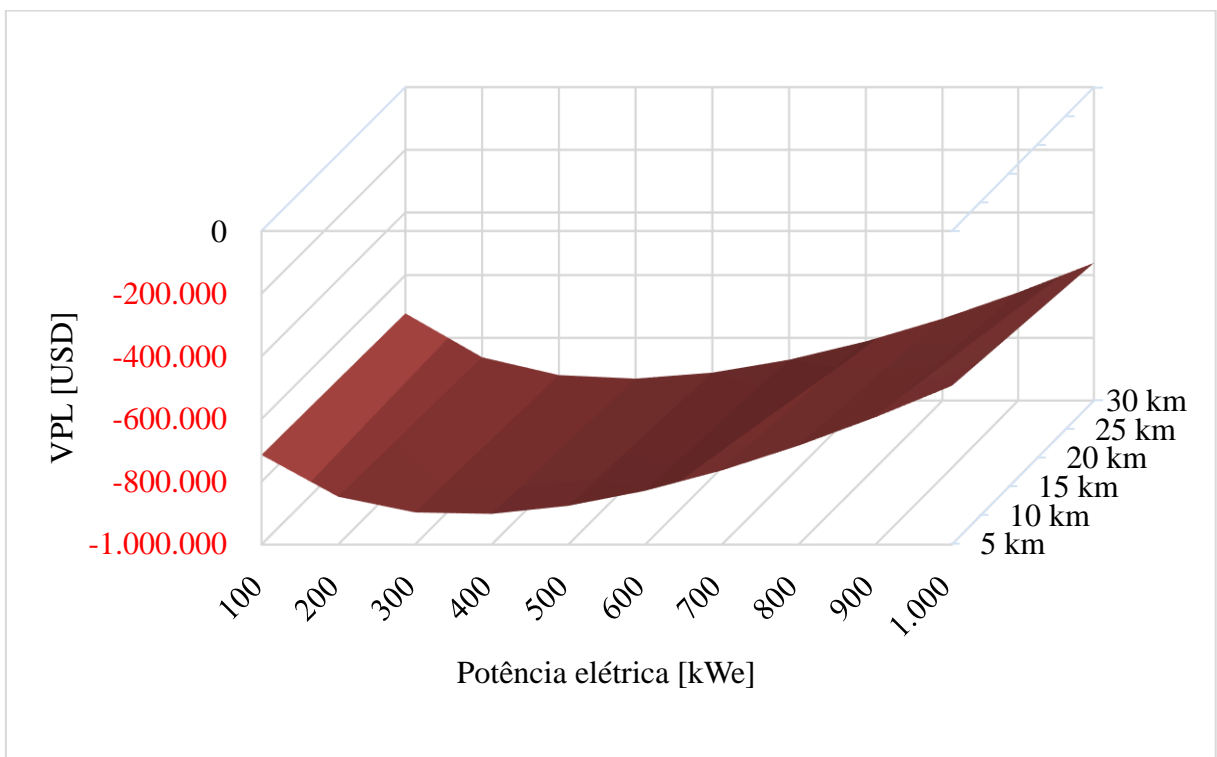


Figura 5.11 – Análise econômica dos sistemas centralizados de co-digestão bovino-capim

Os custos de aquisição da biomassa, silagens de milho e silagens de capim, são os custos que tem uma maior influência na viabilidade econômica dos projetos de biodigestão, em relação aos custos de transporte de biomassa, porque os custos de aquisição de biomassa representam entre 95 - 99% para aquisição de silagem de milho e 93 – 99% para aquisição de silagem de capim elefante. Os custos de aquisição da silagem de capim, é menor, a 19,27 USD/ton, comparado com 28,32 USD/ton da silagem de milho. Para outras condições, como na Inglaterra, os custos são superiores, no entanto, mantem uma proporção similar, tendo custos menores para o silagem de capim, 36,30 USD/ton e 42,29 USD/ton para silagem de milho [83]. Apesar do fato de que necessitaria uma maior área de cultivo para o capim elefante por apresentar um menor rendimento por área plantada (38 ton/ha para silagem de capim e 40 ton/ha para silagem de milho), isto poderia ser compensado pela maior produtividade de biogás da silagem de capim, com 216,6 m<sup>3</sup>/ton, superior ao da silagem de milho com 198 m<sup>3</sup>/ton.

O preço da venda de energia também tem rol importante na viabilidade econômica, sendo que, na análise feita é considerado um preço de venda de energia de 73,46 USD/MWh, o qual é inferior ao preço de venda de outras usinas de biogás que tem economias mais favoráveis e nas quais tem preços de venda de, Itália 268,89 USD/MWh [160], Áustria 142-188 USD/MWh [52], Turquia 113,94 USD/MWh [162], Grécia 91,31 USD/MWh, Suécia 80 USD/MWh [158] e na Holanda 68,36 USD/MWh [161], sendo somente este último inferior ao preço de venda de energia elétrica do Brasil.

## **5.2.4. Análise de sensibilidade**

### **5.2.4.1. Taxa Mínima de Atratividade (TMA)**

Na Figura 5.12 é mostrada a análise de sensibilidade da TMA nos sistemas descentralizados de mono-digestão bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim, sendo que a viabilidade econômica para TMA maiores de zero são a potências elétricas de 172 kWe para mono-digestão descentralizada bovino, 592 kWe para co-digestão descentralizada bovino-milho e 318 kWe para a co-digestão descentralizada bovino-capim. O sistema descentralizado de mono-digestão bovino é o único sistema que supera o TMA de 15%

para potências superiores a 740 kWe. Os sistemas descentralizados de mono-digestão bovino tornam-se viáveis abaixo do TMA de 18,19%, enquanto que os sistemas descentralizados de co-digestão bovino-milho tornam-se viáveis abaixo do TMA de 5,24%, e os sistemas descentralizados de co-digestão bovino-capim tornam-se viáveis abaixo do TMA de 11,51%.

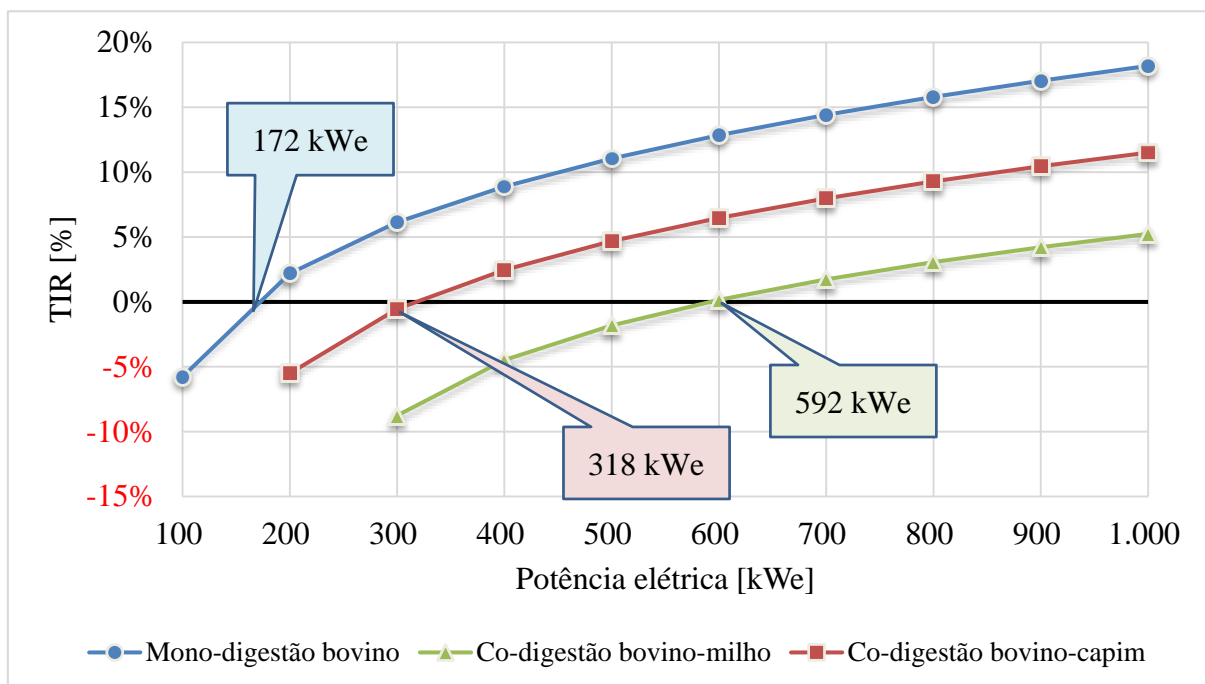


Figura 5.12 – Análise de sensibilidade: influência da TMA nos sistemas descentralizados de mono-digestão bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim

Na análise de sensibilidade do TMA das Figura 5.13 e Figura 5.14, os sistemas centralizados de co-digestão bovino-milho tornam-se viáveis abaixo da média do TMA de 4,82%, enquanto que, os sistemas centralizados de co-digestão bovino-capim tornam-se viáveis abaixo da média do TMA de 11,18%. A TMA baixa dependerá de fatores como, a importância estratégica dos projetos, risco do negócio e rentabilidade da empresa [179].

Na Figura 5.15 mostra-se as potências mínimas, para as quais os sistemas centralizados de co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim são viáveis economicamente, sendo que as potências mínimas em função das distâncias, somente variam uma média de 9 kWe para cada 5 km percorrido.

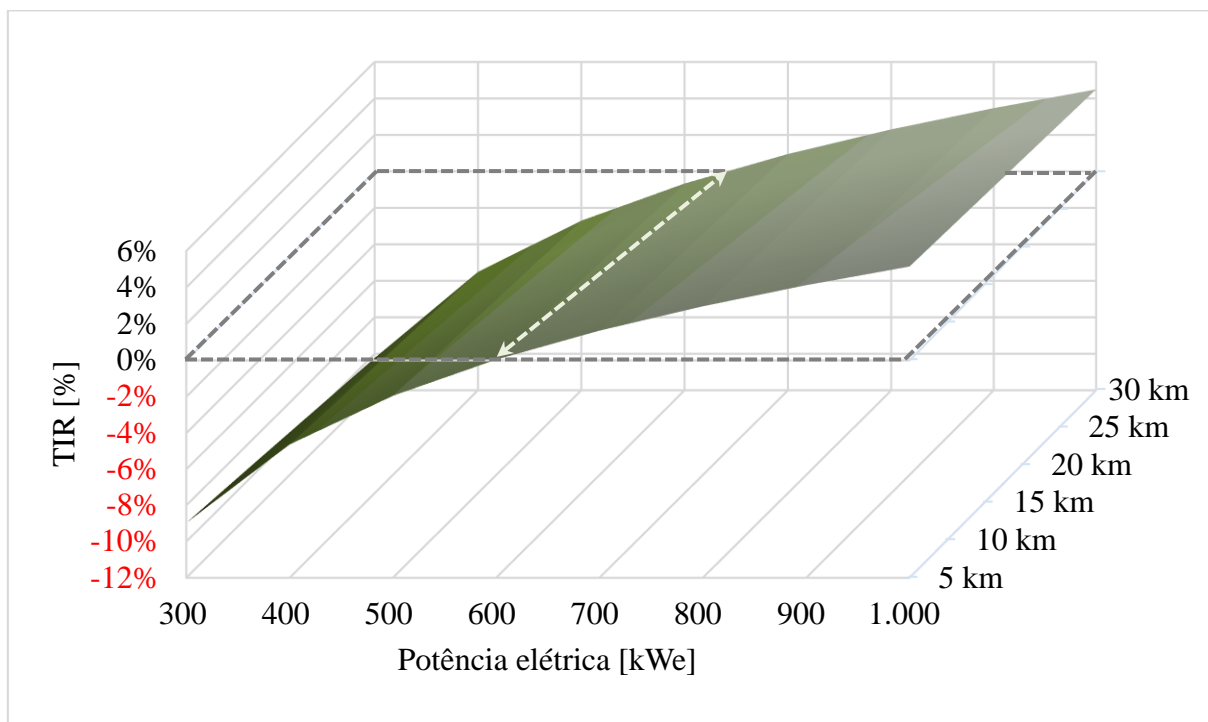


Figura 5.13 – Análise de sensibilidade: influência da TMA nos sistemas centralizados de co-digestão bovino-milho

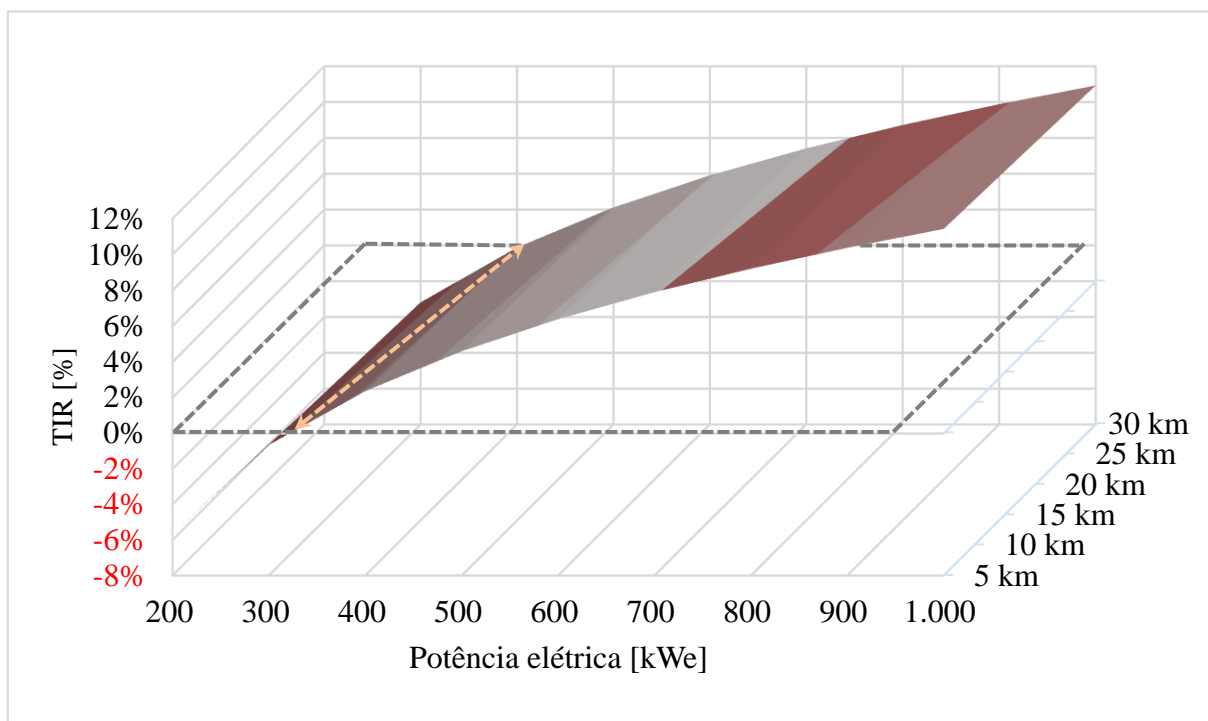


Figura 5.14 – Análise de sensibilidade: influência da TMA nos sistemas centralizados de co-digestão bovino-milho

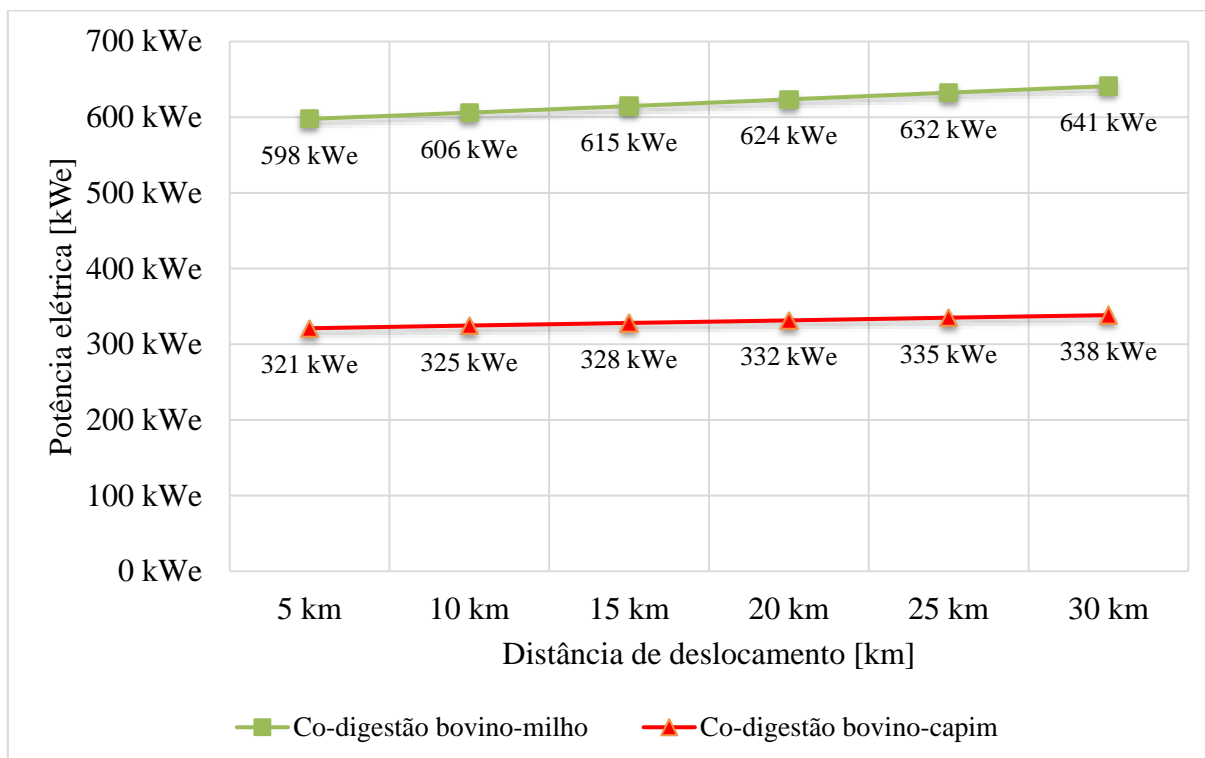


Figura 5.15 –Potências elétricas mínimas dos sistemas centralizados de co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim para as diferentes distâncias de deslocamento de biomassa para potências inferiores a 1.000 kWe

Os valores de viabilidade econômica para TMA maiores de zero são a potências elétricas mínimas médias de 619 kWe para os sistemas centralizados de co-digestão bovino-milho e a potências mínimas médias de 330 kWe para os sistemas centralizados de co-digestão bovino-capim. Os valores obtidos são similares aos valores dos sistemas descentralizados com co-digestão, pois os custos de transporte para distâncias até 30 km para as potências avaliadas, só representam entre 0,91-7,17% dos custos anuais atribuídos aos custos de aquisição de biomassa. Nas seguintes avaliações visando a ter resultados consistentes foram levados em conta somente as distâncias médias relativas para a co-digestão.

#### 5.2.4.2. Custo da biomassa

Na Figura 5.16 e Figura 5.17 mostra-se a análise de sensibilidade do custo da biomassa para os sistemas avaliados, sendo que, para os sistemas de co-digestão bovino-milho, há viabilidade econômica para potências superiores aos 600 kWe, quando a biomassa não tem

custo de aquisição; enquanto que, para custos de aquisição de 5 USD/ton e 10 USD/ton, as potências superiores a 739 kW e 930 kW tornam viáveis economicamente os projetos. Para os sistemas de co-digestão bovino-capim, existe viabilidade econômica para potências superiores aos 595 kW quando a biomassa não tem custo de aquisição; enquanto que, para custos de aquisição de 5 USD/ton e 10 USD/ton, as potências superiores a 724 kW e 897 kW tornam viáveis economicamente os projetos. Os sistemas de co-digestão bovino-milho somente poderiam ser viáveis para preços de aquisição de biomassa inferiores a 11,49 USD/ton, enquanto que, para os sistemas de co-digestão bovino-capim, os preços inferiores a 12,40 USD/ton teriam viabilidade econômica. Os custos de aquisição para silagem de milho e silagem de capim tomados em consideração para a análise econômica inicial, são de 28,32 USD/ton e 19,27 USD/ton, respectivamente.

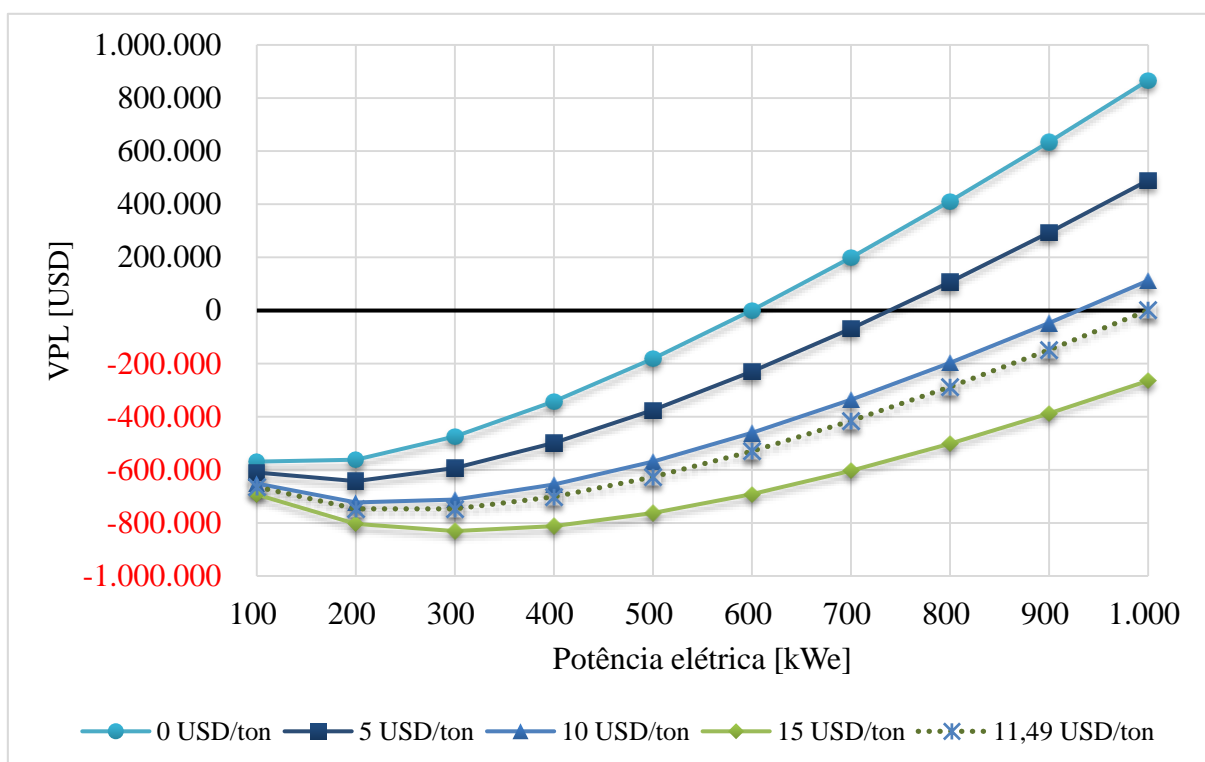


Figura 5.16 – Análise de sensibilidade: influência do custo da biomassa nos sistemas de co-digestão bovino-milho

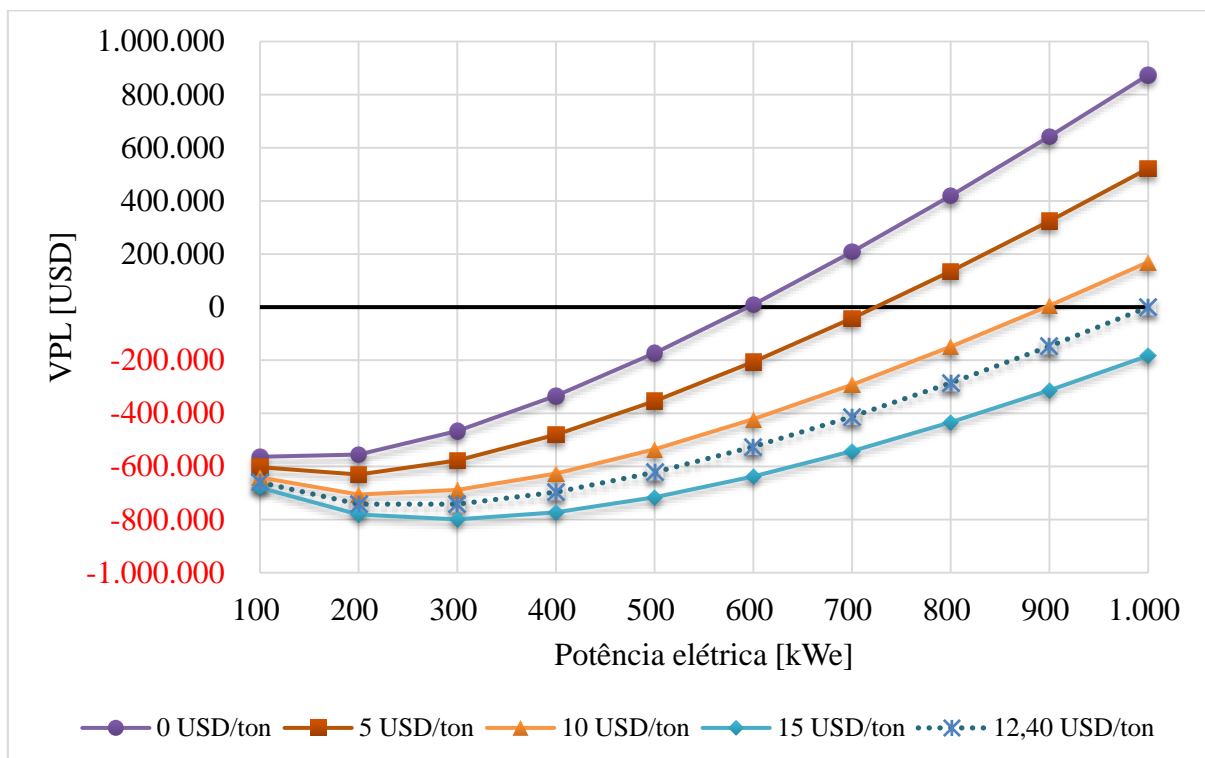


Figura 5.17 – Análise de sensibilidade: influência do custo da biomassa nos sistemas de co-digestão bovino-capim

### 5.2.4.3. Preço de venda de energia

Na Figura 5.18 mostra-se a análise de sensibilidade em relação à influência do preço de venda de energia elétrica do sistema de mono-digestão bovino, na qual haveria valores de VPL positivos a partir de 60,66 USD/MWh. Na Figura 5.19 e Figura 5.20 mostra-se a análise de sensibilidade, em relação à influência do preço de venda de energia elétrica dos sistemas de co-digestão bovino-milho e bovino-capim, tendo viabilidade econômica para maiores preços de venda de energia elétrica, as quais são de 100,36 USD/MWh para o sistema bovino-milho e 83,71 USD/MWh, para os sistemas bovino-capim, sendo este último devido ao menor custo de compra de substrato e maior rendimento de biogás por tonelada digerida. Na Figura 5.21 mostra-se os detalhes dos valores das potências mínimas para os diferentes preços de venda de energia, tendo em consideração que o preço de energia elétrica considerado para a análises econômica foi de 73,46 USD/MWh.

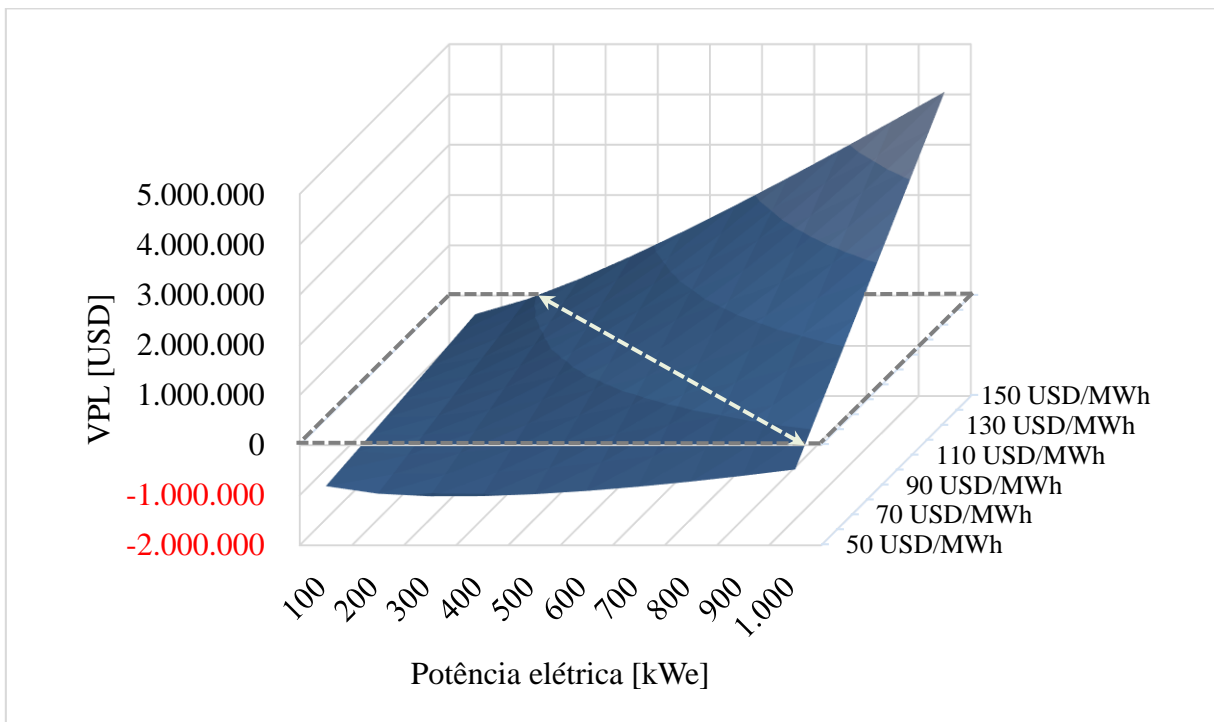


Figura 5.18 – Análise de sensibilidade: influência do preço da energia elétrica nos sistemas de mono-digestão bovino

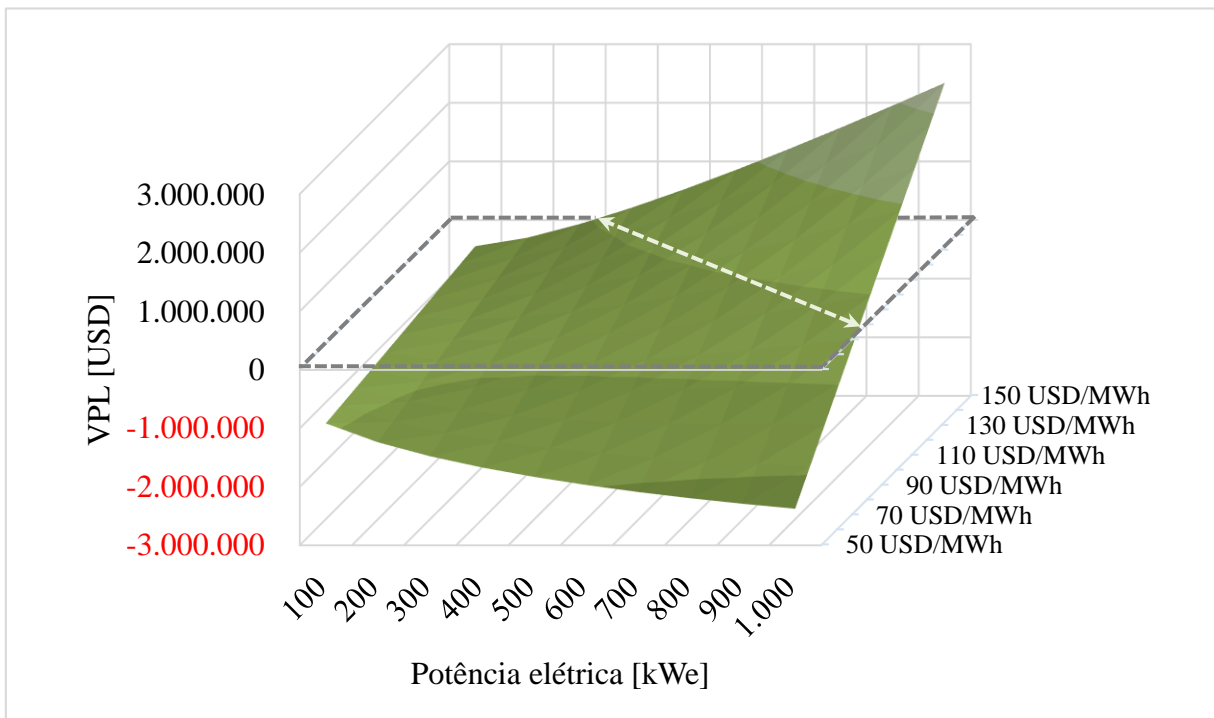


Figura 5.19 – Análise de sensibilidade: influência do preço da energia elétrica nos sistemas de co-digestão bovino-milho

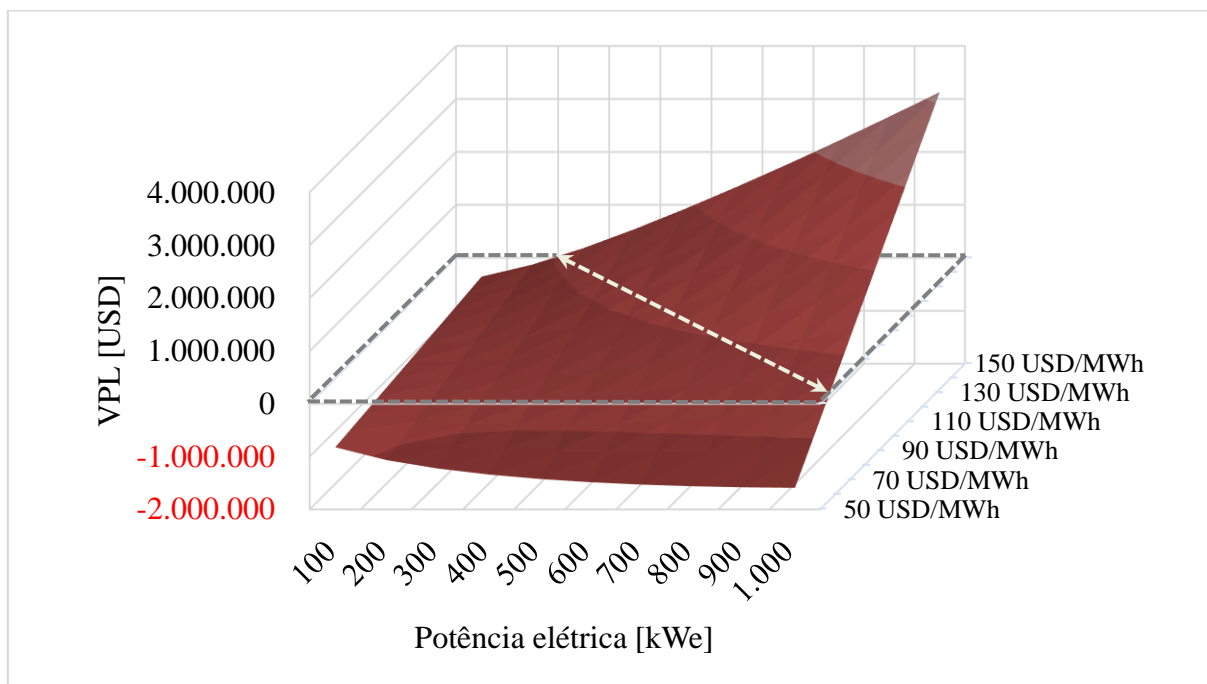


Figura 5.20 – Análise de sensibilidade: influência do preço da energia elétrica nos sistemas de co-digestão bovino-capim

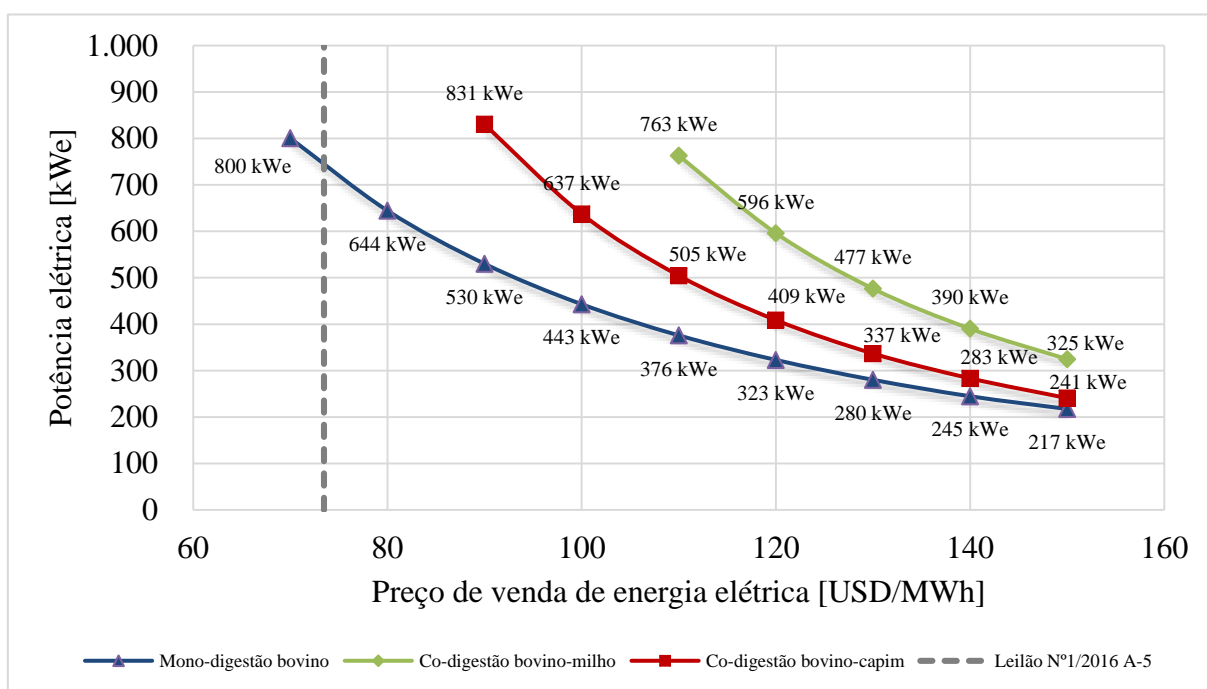


Figura 5.21 – Potência mínima de geração de energia elétrica para os diferentes preços de venda de energia elétrica dos sistemas de mono-digestão bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim

### **5.3. Análises econômicas complementares**

Além das análises econômicas realizadas, também foram feitas as análises econômicas complementares da viabilidade econômica de tamanhos de usinas superiores a 1.000 kWe de potência, tendo em consideração as distâncias percorridas até 50 km para o deslocamento de co-substratos, visando a obter tamanhos ótimos de usinas para diferentes distâncias percorridas. Além disso, também foram feitas as análises para determinar como poderiam projetos que utilizam culturas energéticas dedicadas como co-substratos, silagem de milho e silagem de capim elefante, tornar-se viáveis economicamente, tendo em consideração políticas públicas de incentivo e fortalecimento da digestão anaeróbia a partir de CED. Estes incentivos podem ser na forma de subsídios com respeito ao investimento inicial das usinas de biogás para os tamanhos entre 100 até 1.000 kWe, considerando somente distâncias médias de deslocamento de co-substrato ( $\approx 0$ ).

#### **5.3.1. Tamanho de usina versus deslocamento de co-substratos**

A Figura 5.22 e Figura 5.23 mostram a relação direta do tamanho das usinas de biogás com respeito à viabilidade econômica dos sistemas de co-digestão bovino-milho e bovino-capim para diferentes distâncias percorridas. As distâncias de deslocamento de co-substratos até os 50 km também têm influência na viabilidade para potências superiores a 1.000 kWe, sendo que para sistemas de co-digestão bovino-milho para potências de 2.500 kWe o VPL para uma distância de deslocamento média ( $\approx 0$ ) é 2,88 vezes maior que para uma distância de deslocamento de 50 km; enquanto que, para sistemas de co-digestão bovino-capim, para potências de 1.200 kWe o VPL para uma distância de deslocamento média ( $\approx 0$ ), é 1,60 vezes maior que para a distância de deslocamento de e 50 km.

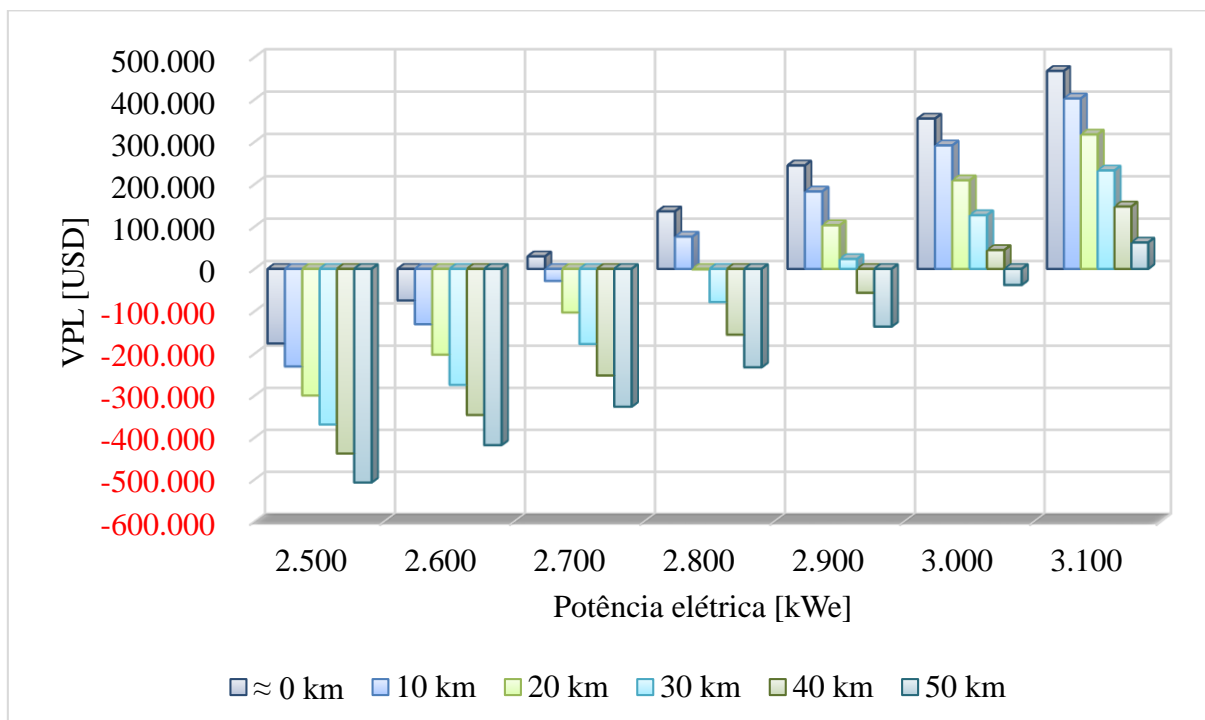


Figura 5.22 – Influência do tamanho e deslocamento dos substratos nos sistemas de co-digestão bovino-milho

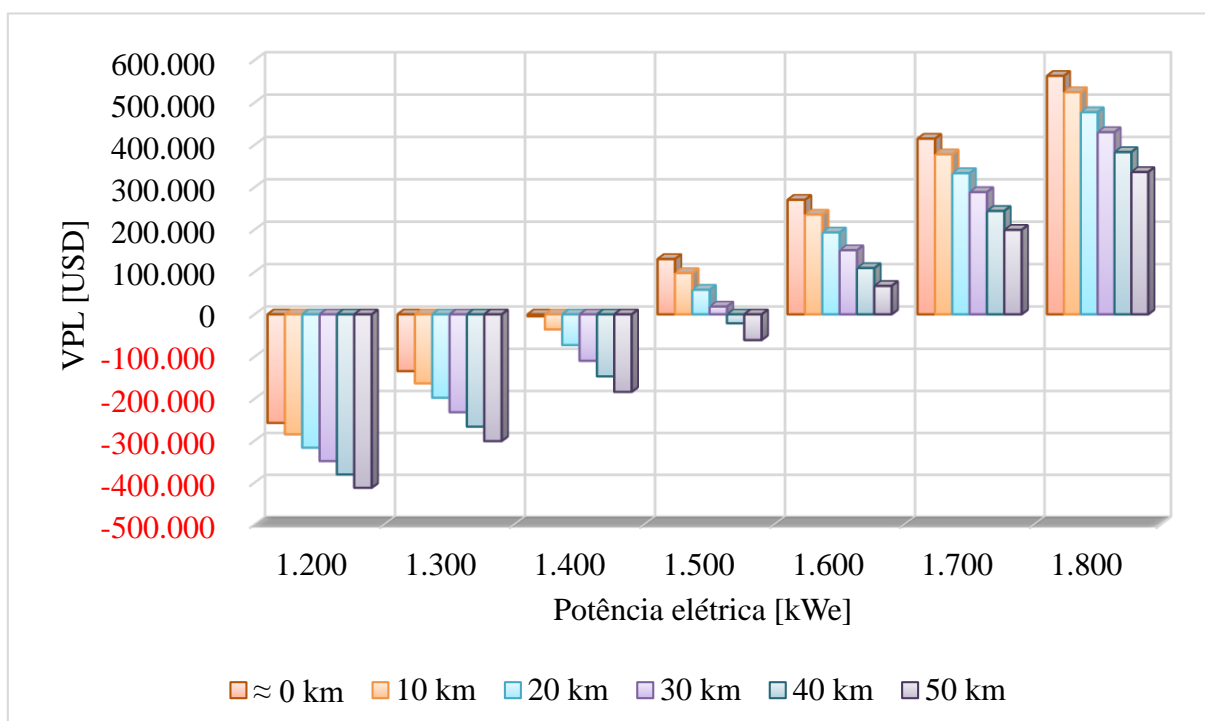


Figura 5.23 – Influência do tamanho e deslocamento dos substratos nos sistemas de co-digestão bovino-capim

A Figura 5.24 apresenta as potências mínimas dos sistemas de co-digestão bovino-milho e bovino-capim para diferentes distâncias percorridas, sendo que, o projeto tem viabilidade econômica nos sistemas de co-digestão bovino-milho a potências superiores que 2.672 kWe, para distâncias médias; 2.727 kWe para distâncias de 10 km; 2.801 kWe para distâncias de 20 km; 2.877 kWe para distâncias de 30 km; 2.956 kWe para distâncias de 40 km; e 3.038 kWe para distâncias de 50 km. Com relação aos sistemas de co-digestão bovino-capim haveria viabilidade econômica para potências superiores de 1.403 kWe para distâncias médias; 1.427 kWe para distâncias de 10 km; 1.456 kWe para distâncias de 20 km; 1.486 kWe para distâncias de 30 km; 1.516 kWe para distâncias de 40 km; e 1.547 kWe para distâncias de 50 km. As potências mínimas médias, tendo em consideração as distâncias médias e as distâncias de 10, 20, 30, 40 e 50 km para sistemas de co-digestão bovino-milho e bovino-capim são de 2.845 kWe e 1.472 kWe, respectivamente.

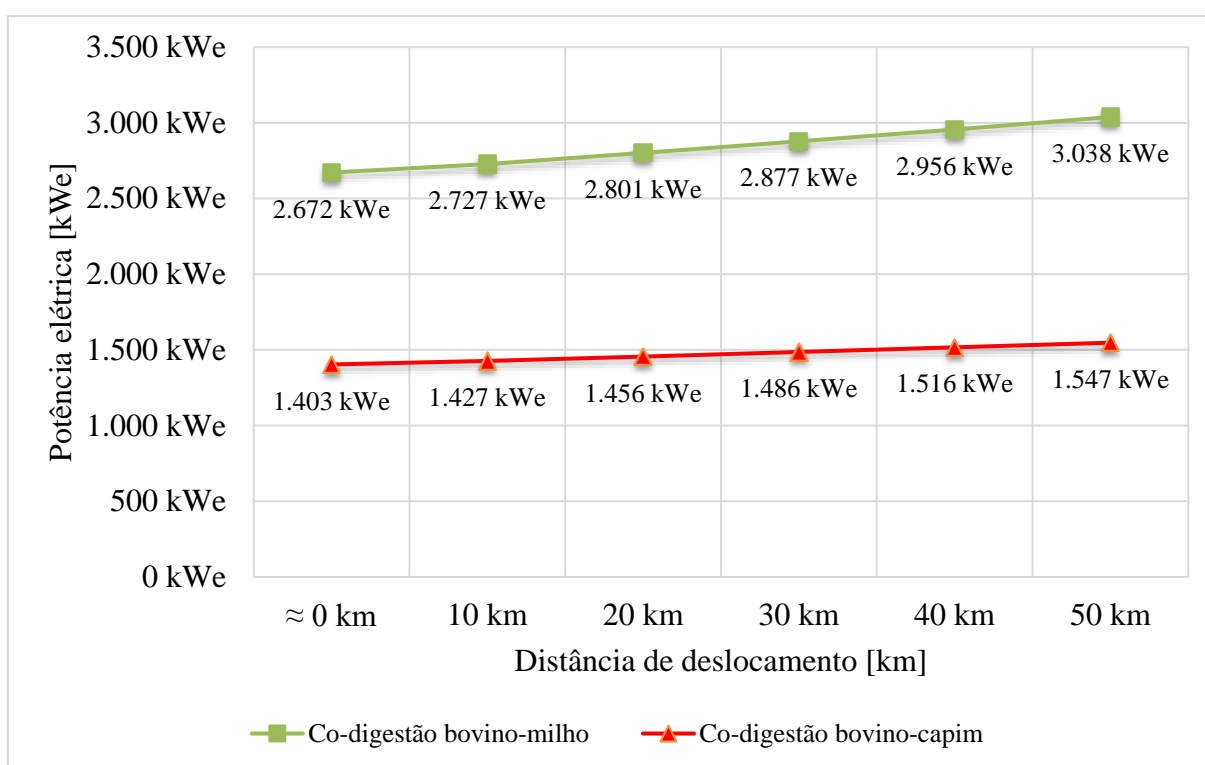


Figura 5.24 –Potências elétricas mínimas dos sistemas de co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim para diferentes distâncias de deslocamento de biomassa para potências superiores a 1.000 kWe

### 5.3.2. Subsídio para o investimento dos sistemas de co-digestão

Na Figura 5.25 mostra-se a análise da percentagem de subsídios com respeito ao investimento inicial, que se necessitaria para que os sistemas de co-digestão se tornem viáveis economicamente para as potências entre 100 até 1.000 kWe, tendo em conta que os sistemas descentralizados de mono-digestão de esterco bovino são viáveis sem necessidade de subsídio a partir de potências superiores a 740 kWe. A análise feita para os sistemas de co-digestão mostra que os sistemas de co-digestão bovino-milho têm viabilidade a partir de subsídios superiores a 48,73%, enquanto que os sistemas de co-digestão bovino-capim, tem economias mais favoráveis e o subsídio para que estes sistemas se tornem viáveis seria a partir de 18,79%. O tamanho das usinas de biogás também tem influência na quantidade de subsídio necessário para tornar viável o investimento, sendo que para potências menores se precisam-se maiores subsídios.

Alguns projetos de digestão anaeróbia nos países de Europa tiveram incentivo para tornar viável o investimento, estes incentivos foram em alguns casos em pagamentos, além da energia vendida, por conexão à rede de baixa tensão, com incentivos de 5,70 USD/MWe [158], ou pagamentos de 110,52 USD/MWh por 10 anos para potências de geração até 2 MWe [161]. No entanto, via de regra, visando a incentivar a utilização de fontes renováveis como o biogás, para geração de energia elétrica e calor em sistemas de CHP, as políticas públicas de incentivo costuma ser de um subsídio de 30% do valor do investimento [52,158,159]. Na análise feita os sistemas de co-digestão bovino-milho com subsídios de 30% do valor do investimento ainda não têm viabilidade econômica, pelo qual precisaria subsídios superiores a 48,73%, para potências de 1.000 kWe; enquanto que, os sistemas de co-digestão bovino-capim com subsídios de 30% têm economias favoráveis para potências superiores a 801 kWe sendo possível precisar de subsídios menores de 18,79%, para potências maiores, de 1.000 kWe.

Finalmente as regulamentações referentes ao sistema de compensação de energia estabelecido pelas Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015 da ANEEL [154,155], podem incentivar as tecnologias baseadas na digestão anaeróbia, pelo fato de que, os projetos compreendidos entre potências de 75 kWp até 5 MWp não precisariam necessariamente de participar nos Leilões de venda de energia para a rede elétrica, logo o preço da venda de energia elétrica por kWh seria comparável ao preço de venda da energia elétrica das empresas

distribuidoras. Isto pode ser possível, no caso, de ter excedente de energia se os projetos consideraram a “Geração compartilhada”, conformando-se em associações na modalidade de cooperativas ou consórcios para negociar internamente o preço de venda de energia elétrica.

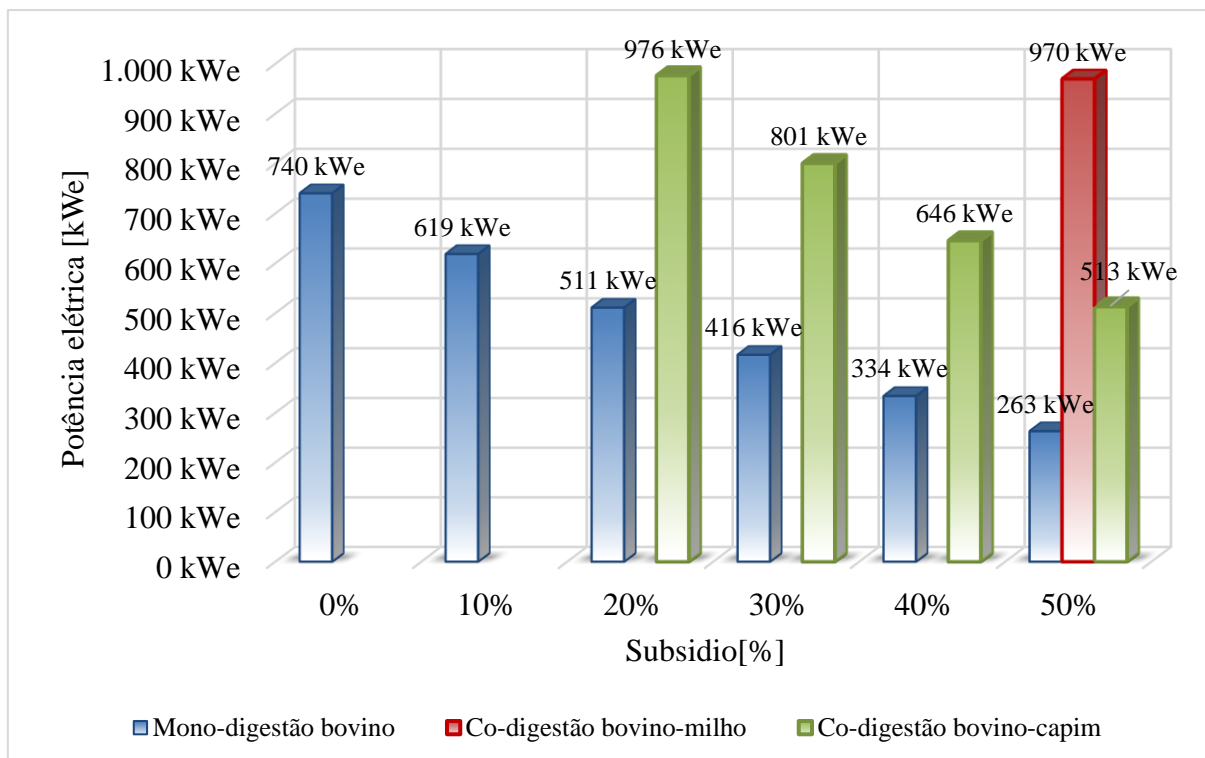


Figura 5.25 –Potências elétricas mínimas dos sistemas de mono-digestão bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim para diferentes subsídios do investimento

## Capítulo 6.

# CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

## 6.1. Conclusões

A avaliação técnica feita serviu para definir os sistemas de produção de biogás centralizado e descentralizado, com relação à utilização dos co-substratos, sendo que a relação carbono: nitrogênio definiu em grande parte a percentagem de co-substratos a utilizar, podendo ser estes utilizados nos intervalos de 22-65% para co-digestão esterco bovino e silagem de milho, e 18-54% para a co-digestão de esterco bovino e silagem de capim.

Os sistemas de digestão anaeróbia propostos têm características de usinas de digestão anaeróbia com tecnologias de alta eficiência, já possuem valores de taxa de carga orgânica (organic loading rate) de 3,77 para usinas em mono-digestão de esterco bovino, 4,15 para usinas de co-digestão esterco bovino e silagem de milho e 4,05 para usinas de co-digestão de esterco bovino e silagem de capim elefante. Os balanços de massa, energia e dimensionamento dos equipamentos foram um ponto de partida para a análise econômica.

A análise econômica mostra que os sistemas de co-digestão bovino-milho e bovino-capim, para potências nos intervalos de 100-1.000 kWe, não tem viabilidade economicamente para os cenários propostos em sistemas descentralizados com distâncias médias e sistemas

centralizados com distâncias até 30 km, enquanto que os sistemas descentralizados de mono-digestão de esterco bovino, mostram economias favoráveis para potências superiores a 740 kWe.

As distâncias de transporte de co-substratos não têm um impacto significativo na análise econômica nas distâncias de até 30 km de deslocamento da biomassa. No entanto, os custos dos co-substratos podem desempenhar um importante papel na economia das usinas de biogás, já que representam custos superiores a 93% do custo total da biomassa referidos à aquisição e transporte.

Os sistemas de co-digestão bovino-milho e bovino-capim, somente serão viáveis economicamente para valores do TMA e custos de aquisição de biomassa abaixo de 4,82% de TMA e 11,49 USD/ton USD/ton para silagem de milho e, 11,18% e 12,40 USD/ton para silagem de capim, tendo que usinas de co-digestão bovino-capim tem melhor viabilidade econômica para menores tamanho de potências instaladas, enquanto usinas de co-digestão bovino-milho precisam de maiores potências instalada, devido principalmente, ao custo de aquisição do substrato e ao rendimento de biogás por toneladas de matéria fresca, pelas características inerentes do co-substrato.

Os sistemas de mono-digestão bovino, são os que tem economias mais favoráveis, que os sistemas de co-digestão bovino-milho e bovino capim, com respeito à análise de sensibilidade do preço de venda da energia elétrica, podendo tolerar incluso preços inferiores ao preço de venda de energia até 60,66 USD/MWh. No entanto, os sistemas de co-digestão precisam preços de venda de energia superiores ao preço estabelecido de 73,46 USD/MWh para tornar-se economicamente viáveis, com preços 100,36 USD/MWh e 83,71 USD/MWh para sistemas bovino-milho e bovino-capim respetivamente, o qual no caso de geração distribuída para autoconsumo, em condomínios, cooperativas ou associações de vizinhos (ANEEL 482/2012 e 687/2015), o custo da energia elétrica seria comparável ao custo da energia fornecida pelas distribuidoras, incrementando as rendas e tornando viáveis iniciativas de geração até 1.000 kWe.

Para potências superiores a 1.000 kWe, as distâncias de deslocamento de biomassa têm impacto na economia das usinas de biogás em co-digestão, valores de VPL 1,60 vezes maiores para deslocamentos até 50 km de capim elefante e 2,88 vezes para deslocamentos de milho. A

potências mínimas médias as quais os sistemas têm viabilidade, são menores para co-digestão bovino-capim (1.472 kWe), enquanto que, para conseguir viabilidade econômica de sistemas de co-digestão bovino-milho se precisariam de potências superiores a 2.845 kWe.

A viabilidade econômica das usinas de biogás centralizadas também se vê afetada por falta de incentivos para o crescimento deste setor, considerando que em outros países para fomentar a tecnologia, são considerados subsídios de até 30% do valor do investimento, tendo em consideração isto, os sistemas de co-digestão bovino-capim são os sistemas que têm viabilidade para subsídios de até 30%, enquanto que os sistemas de co-digestão bovino-milho não apresentam viabilidade nestas condições.

Para otimizar melhor a economia dos processos de digestão anaeróbia, é preciso maximizar os benefícios econômicos. Para isso é necessário que a localização das usinas de biogás no Brasil se encontrem perto de lugares que precisem da energia elétrica e de calor residual, considerando que o calor rejeitado dos sistemas CHP depois da utilização para o aquecimento do biodigestor foi de 6.074 MWh, 6.941 MWh e 6.961 MWh para os sistemas de mono-digestão bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim, respectivamente. Desta forma se pode garantir a viabilidade econômica e o retorno do investimento em menor tempo.

Embora se tenham utilizados os rendimentos de biogás para mistura de substratos em condições ideais com os parâmetros estabelecidos, é importante que, para realizar uma avaliação técnica e econômica de maior confiabilidade, sejam utilizadas curvas de rendimento específicas de biogás para diferentes misturas de substratos com co-substratos. No entanto, estas ainda não estão disponíveis para os substratos estudados.

## 6.2. Recomendações e sugestões para trabalhos futuros

Recomenda-se com a finalidade de aprimorar e complementar os resultados obtidos sejam realizados os seguintes trabalhos:

- Construção de um modelo experimental da produção de biogás a partir de culturas energéticas dedicadas para diferentes intervalos de relação C:N e diferentes proporções de matérias-primas.
- Avaliação experimental da produção de biogás das silagens de milho e capim elefante em sistemas de co-digestão com substrato base de esterco bovino em diferentes proporções.
- Análises da produtividade das características de produção do ácido lático proveniente da fermentação de silagens de culturas energéticas dedicadas.
- Avaliação de Ciclo de Vida da produção de biogás em sistemas descentralizados e centralizados.
- Avaliação do ciclo de vida de biodigestores centralizados: produção específica por tamanho de usina.
- Valorização energética e econômica do calor residual da geração de energia elétrica de sistemas CHP para utilização como fonte de calor nas indústrias suínícolas.
- Valorização energética e econômica do calor residual da geração de energia elétrica de sistemas CHP para utilização como fonte de calor no processo de secagem de produtos agrícolas.
- Reutilização do calor residual da produção de energia elétrica de sistemas CHP para Ciclos Rankine Orgânicos (ORC) e Ciclos Kalina.
- Analisar as políticas públicas existentes, incentivos, regulamentações (Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015), sub-rogação (benefícios da Conta de Consumo de Combustíveis Fósseis – CCC para o desenvolvimento das fontes renováveis de geração de energia elétrica), visando que iniciativas de digestão anaeróbia utilizando CED possam ser viáveis economicamente.

## APÊNDICE A. Dados avaliados e utilizados para a dissertação

### A1. Análise econômica para os diferentes cenários (VPL)

Tabela A.1.1 – Análise econômica dos sistemas descentralizados de mono-digestão bovino, co-digestão bovino-milho e co-digestão bovino-capim

| Potência elétrica [kWe] | Mono-digestão bovino [USD] | Co-digestão bovino-milho [USD] | Co-digestão bovino-capim [USD] |
|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 100                     | -712.305                   | -803.684                       | -713.022                       |
| 200                     | -757.741                   | -1.017.906                     | -845.127                       |
| 300                     | -702.980                   | -1.146.612                     | -894.146                       |
| 400                     | -593.620                   | -1.228.378                     | -897.683                       |
| 500                     | -448.140                   | -1.278.912                     | -871.021                       |
| 600                     | -276.317                   | -1.306.561                     | -822.266                       |
| 700                     | -84.100                    | -1.316.419                     | -756.362                       |
| 800                     | 124.555                    | -1.311.883                     | -676.599                       |
| 900                     | 346.856                    | -1.295.359                     | -585.307                       |
| 1.000                   | 580.738                    | -1.268.630                     | -484.209                       |

Tabela A.1.2 – Análise econômica dos sistemas centralizados de co-digestão bovino-milho

| Potência elétrica [kWe]* | Distância percorrida |            |            |            |            |            |
|--------------------------|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                          | 5 km                 | 10 km      | 15 km      | 20 km      | 25 km      | 30 km      |
| 100                      | -805.115             | -806.690   | -808.266   | -809.841   | -811.416   | -812.992   |
| 200                      | -1.020.575           | -1.023.634 | -1.026.693 | -1.029.752 | -1.032.811 | -1.035.870 |
| 300                      | -1.150.427           | -1.154.938 | -1.159.450 | -1.163.961 | -1.168.473 | -1.172.984 |
| 400                      | -1.233.269           | -1.239.213 | -1.245.158 | -1.251.103 | -1.257.047 | -1.262.992 |
| 500                      | -1.284.823           | -1.292.187 | -1.299.551 | -1.306.915 | -1.314.278 | -1.321.642 |
| 600                      | -1.313.444           | -1.322.216 | -1.330.987 | -1.339.759 | -1.348.531 | -1.357.303 |
| 700                      | -1.324.231           | -1.334.402 | -1.344.573 | -1.354.744 | -1.364.915 | -1.375.086 |
| 800                      | -1.320.587           | -1.332.149 | -1.343.711 | -1.355.273 | -1.366.836 | -1.378.398 |
| 900                      | -1.304.919           | -1.317.866 | -1.330.813 | -1.343.760 | -1.356.707 | -1.369.654 |
| 1.000                    | -1.279.013           | -1.293.339 | -1.307.665 | -1.321.991 | -1.336.317 | -1.350.643 |

\* As outras unidades em USD

Tabela A.1.3 – Análise econômica dos sistemas centralizados de co-digestão bovino-capim

| Potência elétrica [kWe]* | Distância percorrida |          |          |          |          |          |
|--------------------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                          | 5 km                 | 10 km    | 15 km    | 20 km    | 25 km    | 30 km    |
| 100                      | -714.360             | -715.833 | -717.305 | -718.777 | -720.250 | -721.722 |
| 200                      | -847.624             | -850.483 | -853.342 | -856.201 | -859.060 | -861.919 |
| 300                      | -897.714             | -901.931 | -906.147 | -910.364 | -914.581 | -918.798 |
| 400                      | -902.258             | -907.814 | -913.370 | -918.927 | -924.483 | -930.039 |
| 500                      | -876.551             | -883.434 | -890.316 | -897.199 | -904.082 | -910.965 |
| 600                      | -828.706             | -836.905 | -845.104 | -853.303 | -861.502 | -869.701 |
| 700                      | -763.672             | -773.179 | -782.685 | -792.192 | -801.698 | -811.205 |
| 800                      | -684.744             | -695.551 | -706.358 | -717.165 | -727.972 | -738.779 |
| 900                      | -594.254             | -606.355 | -618.457 | -630.558 | -642.659 | -654.761 |
| 1.000                    | -493.928             | -507.319 | -520.709 | -534.099 | -547.489 | -560.880 |

\* As outras unidades em USD

## A2. Distâncias médias de transporte de co-substratos

Tabela A.2.1 – Distâncias médias de transporte de co-substratos para potências superiores às avaliadas dos sistemas descentralizado de co-digestão bovino-milho e bovino- capim

| Co-digestão bovino-milho   |                         | Co-digestão bovino-capim   |                         |
|----------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Potência elétrica<br>[kWe] | Distância média<br>[km] | Potência elétrica<br>[kWe] | Distância média<br>[km] |
| 2.500                      | 2,14                    | 1.200                      | 1,50                    |
| 2.600                      | 2,18                    | 1.300                      | 1,56                    |
| 2.700                      | 2,22                    | 1.400                      | 1,61                    |
| 2.800                      | 2,26                    | 1.500                      | 1,67                    |
| 2.900                      | 2,30                    | 1.600                      | 1,72                    |
| 3.000                      | 2,33                    | 1.700                      | 1,77                    |
| 3.100                      | 2,37                    | 1.800                      | 1,82                    |

### A3. Fornecedores de sistemas de geração de energia elétrica e calor (CHP) para diferentes potências elétricas. Combustível: Biogás

| Empresa                           | Modelo        | Potência |         | Eficiência |         |
|-----------------------------------|---------------|----------|---------|------------|---------|
|                                   |               | Elétrica | Térmica | Elétrica   | Térmica |
|                                   |               | kWe      | KWth    | %          | %       |
| 2G Kraft- Wärme-Kopplung          | filius 104    | 50       | 70      | 35,30      | 49,80   |
|                                   | filius 204    | 64       | 85      | 36,10      | 48,00   |
|                                   | filius R06    | 75       | 89      | 38,00      | 45,20   |
|                                   | filius 106    | 100      | 121     | 38,00      | 45,80   |
|                                   | filius 206    | 150      | 179     | 38,20      | 45,60   |
|                                   | 2G KWK 64 BG  | 64       | 85      | 36,10      | 48,00   |
|                                   | 2G KWK 75 BG  | 75       | 89      | 38,00      | 45,20   |
|                                   | 2G KWK 100 BG | 100      | 121     | 38,00      | 45,80   |
|                                   | 2G KWK 190 BG | 190      | 218     | 38,70      | 44,40   |
|                                   | 2G KWK 250 BG | 250      | 290     | 38,80      | 45,00   |
|                                   | 2G KWK 370 BG | 370      | 431     | 38,80      | 45,20   |
|                                   | agenitor 206  | 220      | 232     | 40,60      | 42,80   |
|                                   | agenitor 306  | 250      | 265     | 41,00      | 43,50   |
|                                   | agenitor 212  | 400      | 445     | 40,10      | 44,60   |
|                                   | agenitor 312  | 450      | 469     | 40,60      | 42,30   |
|                                   | avus 500a     | 527      | 534     | 41,10      | 41,70   |
|                                   | avus 500 plus | 550      | 543     | 42,50      | 41,90   |
|                                   | avus 500b     | 637      | 675     | 40,40      | 42,80   |
|                                   | avus 500c     | 600      | 604     | 41,60      | 41,90   |
|                                   | avus 800a     | 835      | 807     | 39,90      | 38,60   |
|                                   | avus 800b     | 889      | 875     | 42,00      | 41,40   |
|                                   | avus 1000a    | 1067     | 967     | 40,90      | 37,10   |
|                                   | avus 1000b    | 1189     | 1166    | 42,10      | 41,30   |
|                                   | avus 1000c    | 1200     | 1238    | 41,50      | 42,80   |
| avus 1500b                        | 1487          | 1458     | 42,200  | 41,300     |         |
| avus 1500c                        | 1560          | 1628     | 41,200  | 43,000     |         |
| avus 2000c                        | 2000          | 2001     | 42,300  | 42,300     |         |
| SCHNELL<br>Wir wandeln<br>Energie | G100          | 100      | 115     | 36,80      | 42,30   |
|                                   | G155          | 155      | 154     | 40,30      | 40,00   |
|                                   | G235          | 237      | 240     | 40,40      | 40,90   |
|                                   | G250          | 250      | 252     | 40,80      | 41,20   |
|                                   | G300          | 300      | 319     | 39,20      | 41,70   |

| Empresa | Modelo | Potência |         | Eficiência |         |
|---------|--------|----------|---------|------------|---------|
|         |        | Elétrica | Térmica | Elétrica   | Térmica |
|         |        | kWe      | KWth    | %          | %       |
|         | G330   | 332      | 338     | 40,60      | 41,30   |
|         | G500   | 500      | 501     | 41,30      | 41,40   |
|         | G525   | 525      | 526     | 41,30      | 41,40   |
|         | B160   | 160      | 147     | 41,50      | 38,00   |
|         | B250   | 250      | 220     | 45,50      | 40,00   |
|         | B300   | 300      | 272     | 43,00      | 39,00   |
|         | B340   | 340      | 301     | 44,00      | 39,00   |
|         | Z170   | 170      | 160     | 41,50      | 39,00   |
|         | Z210   | 210      | 200     | 42,00      | 40,00   |
|         | Z250   | 250      | 213     | 44,50      | 38,00   |
|         | Z265   | 265      | 219     | 46,00      | 38,00   |
|         | Z460   | 460      | 394     | 42,00      | 38,00   |
|         | Z500   | 500      | 442     | 43,00      | 38,00   |

Fonte: [206,207,208]

## REFERÊNCIAS

- [1] B. Atilgan, A. Azapagic, “Life cycle environmental impacts of electricity from fossil fuels in Turkey”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 106, pp.555–564, Nov. 2015.
- [2] F. C. Drumm, A. E. Gerhardt, G. D. Fernandes, P. Chagas, M. S. Sucolotti, P. D. D. C. Kemerich, “Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores”, *Reget*, vol. 18, pp.66–78, 2014.
- [3] International Energy Agency, “Key World Energy Statistics 2015”, p.81, 2015.
- [4] C. E. Campos Rodríguez, J. C. Escobar Palacio, O. J. Venturini, E. E. Silva Lora, V. M. Cobas, D. Marques Dos Santos, F. R. Lofrano Dotto, V. Gialluca, “Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 52, n.1, pp.109–119, 2013.
- [5] T. F. Stocker, G.-K. D. Qin, L. V. Plattner, S. K. Alexander, N. L. Allen, F.-M. Bindoff, J. a. Bréon, U. Church, S. Cubasch, P. Emori, P. Forster, N. Friedlingstein, J. M. Gillett, D. L. Gregory, E. Hartmann, B. Jansen, R. Kirtman, K. Knutti, P. Krishna Kumar, J. Lemke, V. Marotzke, G. a. Masson-Delmotte, I. I. Meehl, S. Mokhov, V. Piao, D. Ramaswamy, M. Randall, M. Rhein, C. Rojas, D. Sabine, L. D. Shindell, D. G. Talley, V. and S.-P. Xie, “Technical Summary”, em *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. B. and P. M. M. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, Ed. Cambridge & New York: Cambridge University Press, 2013, pp.33–115.
- [6] S. Y. G. Restrepo, “Avaliação de um Sistema de Limpeza integrado a um Conjunto

- Gaseificador de Biomassa/Célula SOFC”, Itajubá: Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá. 166p., 2013.
- [7] Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - PNUD, “Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”, Governo Federal do Brasil. 42p., 2015.
- [8] Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - PNUD, “Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável”. .
- [9] C. E. C. Rodríguez, “Análise Paramétrica das Opções Tecnológicas para a Geração de Eletricidade a Partir de Fontes Geotérmicas Melhoradas de Baixa Temperatura”, Itajubá: Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá. 198p., 2014.
- [10] Empresa de Pesquisa Energética – EPE, “Balanço energético nacional - BEN 2015 - ano base 2014”, Rio de Janeiro, Brasil: EPE. 292p., 2015.
- [11] Empresa de Pesquisa Energética – EPE, “Balanço Energético Nacional 2015 - Ano base 2014”, *Relatório Síntese*, Rio de Janeiro, Brasil: EPE. 62p., 2015.
- [12] Agencia Nacional de Energia Electrica - ANEL, “Matriz de Energia Elétrica”, *Banco de informações de Geração (BIG)*, 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 05 abril 2016.
- [13] Ministério da Ciencia Tecnologia e Inovação - MCTI, *Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil*, 2.<sup>a</sup> ed. Brasilia-DF: MCTI. 168p., 2014.
- [14] J. B. Holm-Nielsen, T. Al Seadi, P. Oleskowicz-Popiel, “The future of anaerobic digestion and biogas utilization”, *Bioresource Technology*, vol. 100, n.22, pp.5478–5484, 2009.
- [15] L. A. B. Cortez, A. da Silva, J. de L. Júnior, R. A. Jordan, L. R. de Castro, “Biodigestão de efluentes”, em *Biomassa para energia*, L. A. B. Cortez (org.), E. E. S. Lora (org.), e E. O. Gómez (org.), Eds. Campinas, São Paulo: UNICAMP. 734p., 2008, pp.495–530.
- [16] C. Lukehurst, A. Bywater, “Exploring the viability of small scale anaerobic digesters in livestock farming”, *IEA Bioenergy*. 51p., 2015.
- [17] X. Wu, W. Yao, J. Zhu, C. Miller, “Biogas and Methane productivity by co-digesting

- swine manure with three crop residues as an external carbon source”, *Bioresource Technology*, vol. 101, n.11, pp.4042–4047, Jun. 2010.
- [18] Miembros de la mesa de Biogás, “El sector del biogás agroindustrial en España”, Madrid: Ministerio de Medio ambiente y Medio Rural y Marino, 2010.
- [19] R. Braun, A. Wellinger, “Potential of Co-digestion. Task 37 - Energy from Biogas and Landfill Gas”, *IEA Bioenergy*, IEA Bioenergy 16p., p.16, 2002.
- [20] T. Amon, B. Amon, V. Kryvoruchko, W. Zollitsch, K. Mayer, L. Gruber, “Biogas production from maize and dairy cattle manure - Influence of biomass composition on the methane yield”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 118, n.1–4, pp.173–182, 2007.
- [21] M. Klocke, E. Nettmann, I. Bergmann, K. Mundt, K. Souidi, J. Mumme, B. Linke, “Characterization of the methanogenic Archaea within two-phase biogas reactor systems operated with plant biomass”, *Systematic and Applied Microbiology*, vol. 31, n.3, pp.190–205, 2008.
- [22] G. Wang, “Biogas Production from Energy Crops and Agriculture Residues”, Technical University of Denmark. Risø-PhD-72(EN). 89p., 2010.
- [23] G. Esposito, L. Frunzo, A. Giordano, F. Liotta, A. Panico, F. Pirozzi, “Anaerobic co-digestion of organic wastes”, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 11, n.4, pp.325–341, Dez. 2012.
- [24] B. Kulišić, V. Par, R. Metzler, “Calculation of on-farm biogas potential: A Croatian case study”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 74, pp.66–78, 2015.
- [25] A. L. Zanette, “Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil”, Rio de Janeiro, Brasil: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 97p., 2009.
- [26] B. Demirel, P. Scherer, O. Yenigun, T. T. Onay, “Production of Methane and Hydrogen from Biomass through Conventional and High-Rate Anaerobic Digestion Processes”, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 40, n.2, pp.116–146, 2010.
- [27] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit - GIZ, *Guide to Biogas: From production to use*, 5.<sup>a</sup> ed. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR).

- 229p., 2010.
- [28] Ministério das Cidades - Brasil, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit - GIZ, “Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização”, Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). 233p., 2010.
- [29] T. Karlsson, O. Konrad, M. Lumi, N. P. Schmeier, M. Marder, C. E. Casaril, F. F. Koch, A. G. Pedroso, *Manual Básico de Biogas*. Lajeado: Univates. 69p., 2014.
- [30] S. McKinsey Zicari, “Removal of Hydrogen Sulfide From Biogas Using Cow-Manure Compost”, Ithaca, NY: Thesis of Master. Cornell University. 120p., 2003.
- [31] M. Garfi, P. Gelman, J. Comas, W. Carrasco, I. Ferrer, “Agricultural reuse of the digestate from low-cost tubular digesters in rural Andean communities”, *Waste Management*, vol. 31, n.12, pp.2584–2589, Dez. 2011.
- [32] Encyclopedia Britannica, “Biogas”, *Britannica Academic*, 2016. Disponível em: <<http://academic-eb-britannica.ez38.periodicos.capes.gov.br/EBchecked/topic/1692459/biogas>>. Acesso em: 01 outubro 2015.
- [33] T. Bond, M. R. Templeton, “History and future of domestic biogas plants in the developing world”, *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, n.4, pp.347–354, 2011.
- [34] K. R. Salomon, “Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade”, Itajubá: Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá. 219p., 2007.
- [35] L. A. H. Nogueira, *Biodigestão: a alternativa energética*, 1.<sup>a</sup> ed. São Paulo: Nobel. 93p., 1986.
- [36] D. Deublein, A. Steinhauser, *Biogas from Waste and Renewable Resources*, 1.<sup>a</sup> ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 443p., 2008.
- [37] Empresa de Engenharia Ambiental - EEA, “Tratamento Anaeróbio”, *Curso de Tratamento de Esgoto*, Rio Claro, São Paulo: EEA, pp.196–236, 2004.
- [38] L. Zhang, C. Wang, “Energy and GHG analysis of rural household biogas systems in China”, *Energies*, vol. 7, n.2, pp.767–784, 2014.
- [39] N. A. da Silva, “O biogas e o biofertilizante no balanço energético do Brasil”, *Revista*

- DAE*, vol. 44, n.136, pp.22–29, 1984.
- [40] Ministério das Cidades - Brasil, “Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil - PROBIOGÁS”, 2013. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/saneamento-cidades/probiogas>>. Acesso em: 05 setembro 2015.
- [41] J. Cheng, *Biomass to Renewable Energy Processes*. Northwest, Washington, D.C: CRC Press. 518p., 2009.
- [42] A. Coldebella, “Viabilidade do Uso do Biogás da Bovinocultura e Suinocultura para Geração de Energia Elétrica e Irrigação em Propriedades Rurais”, Cascavel: Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 74p., 2006.
- [43] M. H. Gerardi, *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. 188p, 2003.
- [44] D. Rutz, *Sustainable heat use of biogas plants. A handbook*, 2.<sup>a</sup> ed. Munich, Germany: WIP Renewable Energies, 2015.
- [45] J. L. Walsh, C. C. Ross, M. S. Smith, S. R. Harper, “Utilization of biogas”, *Biomass*, vol. 20, n.3–4, pp.277–290, Jan. 1989.
- [46] J. James L. Walsh, C. C. Ross, M. S. Smith, S. R. Harper, W. A. Wilkins, *Biogas utilization Handbook*. Atlanta, Georgia: U. S. Department of Energy. 132p., 1988.
- [47] Swedish Gas Centre, *Basic Data on Biogas*. 2012.
- [48] A. S. Teodorita, D. Rutz, H. Prassl, M. Kottner, T. Finsterwalder, S. Volk, R. Janssen, *Biogas Handbook*. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg. 125p., 2008.
- [49] O. Eriksson, “Environmental Technology Assessment of Natural Gas Compared to Biogas”, *Natural Gas*, vol. 1, pp.127–147, 2010.
- [50] J. M. Herrero, *Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación*. La Paz, Bolivia: GTZ. 81p., 2008.
- [51] E. E. S. Lora, O. J. Venturini, *Biocombustíveis*. Rio de Janeiro: Interciência.1200p., 2012.
- [52] C. Walla, W. Schneeberger, “The optimal size for biogas plants”, *Biomass and*

- Bioenergy*, vol. 32, n.6, pp.551–557, 2008.
- [53] Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis - ANP (Brasil), “Fatores de conversão, densidades e poderes caloríficos inferiores. Valores médios para o ano 2014”, *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2015*, pp.158987–158987, 2015.
- [54] Petrobras (Brasil), “Gás Liquefeito de Petróleo. Informações técnicas”, *Informações Técnicas*, 2013.
- [55] Greca Asfaltos, “Oleo Xisto”. Disponível em: <[http://www.grecaasfaltos.com.br/folderes/folder\\_oleo\\_xisto\\_digital\\_final.pdf](http://www.grecaasfaltos.com.br/folderes/folder_oleo_xisto_digital_final.pdf)>. Acesso em: 13 outubro 2015.
- [56] Curso de Geração de Energia Elétrica, “Geração térmica”, *Poder Calorífico*. Disponível em: <<http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>>. Acesso em: 13 outubro 2015.
- [57] D. A. Rossi, “Avaliação morfoagronômica e da qualidade da biomassa de acessos de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) para fins energeticos no Norte Fluminense”, Campos dos Goytacazes: Dissertação de Mestrado. Universidade estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 55p., 2010.
- [58] Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, *Climate change 2007: The Physical Science Basis. The Working Group I contribution to the IPCC Fourth Assessment Report - AR4*, Errata. IPCC. pp.1-6, 2012.
- [59] Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, *Climate change 2007: The Physical Science Basis. The Working Group I contribution to the IPCC Fourth Assessment Report - AR4*, 1.<sup>a</sup> ed. IPCC. 996p., 2007.
- [60] J. O. B. Carioca, H. L. Arora, *Biomassa Fundamentos e Aplicações tecnológicas*, UFC. 644p. Ceará, 1984.
- [61] R. Mambeli Barros, *Tratado de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro: Interciência. 374p., 2012.
- [62] T. Abbasi, S. M. Tauseef, S. a. Abbasi, “Anaerobic digestion for global warming control and energy generation - An overview”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n.5, pp.3228–3242, 2012.

- [63] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), “Guía sobre el Biogás: Desde la producción hasta el uso”, Gülzow, p.246, 2010.
- [64] P. E. Rouvière, R. S. Wolfe, “Use of subunits of the methylreductase protein for taxonomy”, *Archives of Microbiology*, vol. 148, pp.253 – 259, 1987.
- [65] L. Appels, J. Lauwers, J. Degreve, L. Helsen, B. Lievens, K. Willems, J. Van Impe, R. Dewil, “Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n.9, pp.4295–4301, 2011.
- [66] T. R. Silva, “Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro sanitário: Estudo de caso do aterro sanitário de Itajubá-MG.”, Itajubá: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. 161p., 2012.
- [67] A. J. Ward, P. J. Hobbs, P. J. Holliman, D. L. Jones, “Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources”, *Bioresource Technology*, vol. 99, n.17, pp.7928–7940, 2008.
- [68] I. Dioha, C. Ikeme, T. Nafi’u, N. Soba, M. B. S. Yusuf, “Effect of carbon to nitrogen ratio on biogas production”, *International Research Journal of Natural Sciences*, vol. 1, n.3, pp.1–10, 2013.
- [69] T. Amon, B. Amon, V. Kryvoruchko, W. Zollitsch, K. Mayer, L. Gruber, “Biogas production from maize and dairy cattle manure-Influence of biomass composition on the methane yield”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 118, n.1–4, pp.173–182, 2007.
- [70] K. Rajendran, S. Aslanzadeh, M. J. Taherzadeh, “Household biogas digesters: A review”, *Energies*, vol. 5, n.8, pp.2911–2942, 2012.
- [71] D. Deublein, A. Steinhauser, *Biogas from Waste and Renewable Resources*, 2.<sup>a</sup> ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 550p., 2011.
- [72] A. Zanetti, L. . Arrieche, D. J. . Sartori, “Estudo da composição ótima de diferentes resíduos orgânicos para a produção de biogás”, em *XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ*, 2014, pp.1–8.
- [73] P. Kalač, “The required characteristics of ensiled crops used as a feedstock for biogas

- production: a review”, *Journal of Agrobiolology*, vol. 28, n.2, pp.85–96, Jan. 2011.
- [74] R. Rynk, *On-Farm Composting Handbook: NRAES-54*, 1.<sup>a</sup> ed. New York: PALS. 186p., 1992.
- [75] F. Weißbach, C. Strubelt, “Correction of Dry Matter Content in Sugar Beet Silages as a Substrate for Biogas Production”, *Landtechnik*, vol. 63, n.6, pp.354–356, 2008.
- [76] Ministerio de Energía - Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO, Global Environment Facility - GEF, *Manual de Biogás*. Santiago de Chile: FAO. 120p., 2011.
- [77] X. Wang, X. Lu, F. Li, G. Yang, “Effects of Temperature and Carbon-Nitrogen (C/N) Ratio on the Performance of Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure, Chicken Manure and Rice Straw: Focusing on Ammonia Inhibition”, *PLoS ONE*, vol. 9, n.5, p.e97265, Mai. 2014.
- [78] D. Yu, J. M. Kurola, K. Lähde, M. Kymäläinen, A. Sinkkonen, M. Romantschuk, “Biogas production and methanogenic archaeal community in mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion processes”, *Journal of Environmental Management*, vol. 143, pp.54–60, 2014.
- [79] J. A. Chacon Guargado, *Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas*, CUBASOLAR. Ciudad de la Habana: CUBASOLAR. 67p., 2007.
- [80] M. Garfí, L. Ferrer-Martí, V. Villegas, I. Ferrer, “Psychrophilic anaerobic digestion of guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude”, *Bioresource Technology*, vol. 102, n.10, pp.6356–6359, 2011.
- [81] I. Ferrer, M. Garfí, E. Uggetti, L. Ferrer-Martí, A. Calderon, E. Velo, “Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, n.5, pp.1668–1674, Mai. 2011.
- [82] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - IDAE, *Biomasa: Digestores anaerobios*. Madrid: IDAE. 48p., 2007.
- [83] L. Hopwood, “Farm-Scale Anaerobic Digestion Plant Efficiency”, Heslington: NNFRR. 35p., 2011.

- [84] SUMA, “Agitadores”, *agitador axial submergível*, 2016. Disponível em: <[http://www.suma.de/PT/Agitadores\\_Biogas.php](http://www.suma.de/PT/Agitadores_Biogas.php)>. Acesso em: 05 maio 2016.
- [85] J. Lindmark, E. Thorin, R. Bel Fdhila, E. Dahlquist, “Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp.1030–1047, 2014.
- [86] J. Lindmark, P. Eriksson, E. Thorin, “The effects of different mixing intensities during anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste”, *Waste Management*, vol. 34, n.8, pp.1391–1397, 2014.
- [87] A. Lemmer, H.-J. Naegele, J. Sondermann, “How Efficient are Agitators in Biogas Digesters? Determination of the Efficiency of Submersible Motor Mixers and Incline Agitators by Measuring Nutrient Distribution in Full-Scale Agricultural Biogas Digesters”, *Energies*, vol. 6, n.12, pp.6255–6273, Dez. 2013.
- [88] A. Kowalczyk, E. Harnisch, S. Schwede, M. Gerber, R. Span, “Different mixing modes for biogas plants using energy crops”, *Applied Energy*, vol. 112, pp.465–472, 2013.
- [89] J. E. R. Couper, R. Erdlac, N. Lieberman, W. K. Muhlbauer, S. A. Sheri, K. Dragoon, R. Islam, P. Martin, A. Y. C. Nee, J. G. Speight, *Biogas production*. New Jersey: Scrivener & John Wiley & Sons. 320p., 2012.
- [90] PROBIOGÁS, “Caderno 1 - Catálogo de tecnologias e empresas de biogás”, p.102, 2014.
- [91] B. Fezzani, R. Ben Cheikh, “Two-phase anaerobic co-digestion of olive mill wastes in semi-continuous digesters at mesophilic temperature”, *Bioresource Technology*, vol. 101, n.6, pp.1628–1634, Mar. 2010.
- [92] M. Poeschl, S. Ward, P. Owende, “Environmental impacts of biogas deployment - Part II: Life Cycle Assessment of multiple production and utilization pathways”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 24, pp.184–201, 2012.
- [93] M. Poeschl, S. Ward, P. Owende, “Environmental impacts of biogas deployment – Part I: life cycle inventory for evaluation of production process emissions to air”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 24, pp.168–183, 2012.
- [94] T. Pullem, *Anaerobic Digestion - Making Biogas - Making Energy*, 1.<sup>a</sup> ed. New York: Routledge. 183p., 2015.

- [95] Z. Song, C. Zhang, G. Yang, Y. Feng, G. Ren, X. Han, “Comparison of biogas development from households and medium and large-scale biogas plants in rural China”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp.204–213, 2014.
- [96] Netherlands Development Organisation SNV, “The Modified - ‘ CAMARTEC ’ Biogas Plants Construction Training Manual”, n.December, 2009.
- [97] S. Cheng, Z. Li, H. P. Mang, E. M. Huba, “A review of prefabricated biogas digesters in China”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, pp.738–748, 2013.
- [98] P. C. Ghimire, “SNV supported domestic biogas programmes in Asia and Africa”, *Renewable Energy*, vol. 49, pp.90–94, 2013.
- [99] N. Duan, C. Lin, P. Wang, J. Meng, H. Chen, X. Li, “Ecological analysis of a typical farm-scale biogas plant in China”, *Frontiers of Earth Science*, vol. 8, n.3, pp.375–384, Set. 2014.
- [100] ABPP, “Africa Biogas Partnership Programme”, *Renewable Energy*, 2015. Disponível em: <<http://africabiogas.org/>>. Acesso em: 31 maio 2015.
- [101] M. Landi, B. K. Sovacool, J. Eidsness, “Cooking with gas: Policy lessons from Rwanda’s National Domestic Biogas Program (NDBP)”, *Energy for Sustainable Development*, vol. 17, n.4, pp.347–356, 2013.
- [102] Servicio Holandes de Cooperacion al Desarrollo - SNV, “Plan del Programa Nacional de Biodigestores en Perú”, SNV, Hivos, Soluciones Prácticas, 2013.
- [103] Servicio Holandes de Cooperacion al Desarrollo - SNV, “Estudio de Factibilidad para un Programa Nacional de Biogás Doméstico en Perú”, SNV, Hivos, Soluciones Prácticas, 2012.
- [104] I. Angelidaki, B. . Ahring, “Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: Effect of temperature”, *Water Research*, vol. 28, n.3, pp.727–731, 1994.
- [105] M. A. Morais, “Estudo experimental e avaliação econômica da operação de biodigestores tubulares para a produção de biogás a partir de resíduos da suinocultura”, Itajubá: Universidade Federal de Itajubá. Dissertação de mestrado.92p., 2012.
- [106] A. P. Valles, J. V. Piñas, F. A. Bedoya, M. Veen, “Proyecto “ BioSinergia ” energía eléctrica en la comunidad de Santa Rosillo , a partir de la producción local de biogás”,

- Tarapoto, Peru: SNV & Soluciones Prácticas, 2011.
- [107] T. Al Seadi, C. Lukehurst, T. Al Saedi, C. Lukehurst, T. Al Seadi, C. Lukehurst, “Quality management of digestate from biogas plants used as fertiliser”, *IEA Bioenergy, Task, n.Task 37 -Energy from Biogas*, p.40, 2012.
- [108] K. Hjort-gregersen, J. Christensen, “Centralised biogas plants”, *Integrated Energy Production, Waste Treatment and Nutrient Redistribution Facilities*, Denmark: Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics, pp.1–32, 1999.
- [109] Lemvig Biogasanlæg A.m.b.A., “Lemvig Biogasanlæg A.m.b.A.”, *Lemvig Biogasanlæg A.m.b.A.*, 2015. Disponível em: <<http://www.lemvigbiogas.com/>>. Acesso em: 09 outubro 2015.
- [110] BIOEXELL -European Biogas Centre of Excellence, “Biogas from AD - BIOEXELL Training Manual”, p.88, 2008.
- [111] J. Nielsen, P. Oleskowicz-Popiel, “The Future of Biogas in Europe - Visions and Targets for 2020”, *The Future of Biogas in Europe III*, n.June, pp.101–107, 2007.
- [112] M. Garfí, L. Ferrer-Martí, I. Perez, X. Flotats, I. Ferrer, “Codigestion of cow and guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude”, *Ecological Engineering*, vol. 37, n.12, pp.2066–2070, 2011.
- [113] T. Q. Frandsen, L. Rodhe, A. Baky, M. Edström, K. Sipilä, I., S. L. Petersen, K. Tybirk, “Best Available Technologies for Pig Manure Biogas Plants in the Baltic Sea Region”, Stockholm: Baltic Sea 2020. 159p., p.159, 2011.
- [114] W. Wilawan, P. Pholchan, P. Aggarangsi, “Biogas production from co-digestion of Pennisetum purpurem cv. Pakchong 1 grass and layer chicken manure using completely stirred tank”, *Energy Procedia*, vol. 52, pp.216–222, 2014.
- [115] M. E. González-Sánchez, S. Pérez-Fabiel, A. Wong-Villarreal, R. Bello-Mendoza, G. Yañez-Ocampo, “Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia”, *Revista Argentina de Microbiología*, vol. 47, n.3, pp.229–235, Jul. 2015.
- [116] J. B. Holm-Nielsen, T. Al Seadi, P. Oleskowicz-Popiel, “The future of anaerobic digestion and biogas utilization”, *Bioresource Technology*, vol. 100, n.22, pp.5478–5484, 2009.

- [117] R. A. Labatut, L. T. Angenent, N. R. Scott, “Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates”, *Bioresource Technology*, vol. 102, n.3, pp.2255–2264, 2011.
- [118] K. Koch, M. Wichern, M. Lübken, H. Horn, “Mono fermentation of grass silage by means of loop reactors”, *Bioresource Technology*, vol. 100, n.23, pp.5934–5940, Dez. 2009.
- [119] Z. ul Z. Asam, T. G. Poulsen, A. S. Nizami, R. Rafique, G. Kiely, J. D. Murphy, “How can we improve biomethane production per unit of feedstock in biogas plants?”, *Applied Energy*, vol. 88, n.6, pp.2013–2018, 2011.
- [120] M. Hutňan, V. Špalková, I. Bodík, N. Kolesárová, M. Lazor, “Biogas production from maize grains and maize silage”, *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 19, n.2, pp.323–329, 2010.
- [121] P. Weiland, “Biogas production: current state and perspectives”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 85, n.4, pp.849–860, Jan. 2010.
- [122] A. Lehtomäki, S. Huttunen, J. A. Rintala, “Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production: Effect of crop to manure ratio”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 51, n.3, pp.591–609, Set. 2007.
- [123] A. Lehtomäki, S. Huttunen, T. M. Lehtinen, J. A. Rintala, “Anaerobic digestion of grass silage in batch leach bed processes for methane production”, *Bioresource Technology*, vol. 99, n.8, pp.3267–3278, 2008.
- [124] M. Luna-delRisco, A. Normak, K. Orupöld, “Biochemical methane potential of different organic wastes and energy crops from Estonia”, *Agronomy Research*, vol. 9, n.1–2, pp.331–342, 2011.
- [125] R. L. R. Steinmetz, A. Kunz, A. C. do Amaral, H. M. Soares, T. Schmidt, H. Wedwitschka, “Suggested method for mesophilic inoculum acclimation to BMP assay”, *Embrapa*, vol. 1, n.1, Concórdia - SC: Embrapa, pp.1–8, 2014.
- [126] C. Rico, R. Diego, A. Valcarce, J. L. Rico, “Biogas Production from Various Typical Organic Wastes Generated in the Region of Cantabria ( Spain ): Methane Yields and Co-Digestion Tests”, n.June, pp.128–136, 2014.

- [127] M. Garfí, J. Martí-Herrero, A. Garwood, I. Ferrer, “Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp.599–614, Jul. 2016.
- [128] J. C. E. Palacio, D. J. R. Orozco, E. S. Lora, O. J. Venturini, R. M. Barros, “Procesos biológicos de conversión”, em *Bioenergía: Fuentes, conversion e sustentabilidad*, 1.<sup>a</sup> ed., J. M. R. Martínez e E. E. S. Lora, Eds. Bogotá: CYTED. 332p., 2014, p.332.
- [129] A. R. Angonese, A. T. Campos, R. a. Welter, “Potencial de redução de emissão de equivalente de carbono de uma unidade suinícola com biodigestor”, *Engenharia Agrícola*, vol. 27, n.3, pp.648–657, Dez. 2007.
- [130] C. M. Ribeiro, “Análise energética, econômica e ambiental da biodigestão de resíduos agropecuários gerados por pequenos e médios produtores rurais da região sul do espírito santo”, São Paulo: Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 207p., 2013.
- [131] A. L. F. Hellwing, M. R. Weisbjerg, H. B. Møller, “Enteric and manure-derived methane emissions and biogas yield of slurry from dairy cows fed grass silage or maize silage with and without supplementation of rapeseed”, *Livestock Science*, vol. 165, n.1, pp.189–199, Jul. 2014.
- [132] I. M. de R. L. Frondizi, “O mecanismo de desenvolvimento limpo: guia de orientação”, *Imperial Novo Milênio*, Rio de Janeiro: FIDES. 131p., 2009.
- [133] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, “Efetivo dos rebanhos por tipo de rebanho”, *Pesquisa Pecuária Municipal*, IBGE, 2014.
- [134] L. da S. Borges, F. C. de Aquino, A. F. Evangelista, “Potencial do capim elefante para geração de bioenergia - revisão”, *Nutri-Time*, vol. 13, n.1, pp.4518–4523, 2016.
- [135] R. Braun, P. Weiland, A. Wellinger, “Biogas from energy crop digestion”, *IEA Bioenergy Task*, IEA, 2008.
- [136] A. Prochnow, M. Heiermann, M. Plöchl, T. Amon, P. J. Hobbs, “Bioenergy from permanent grassland - A review: 2. Combustion”, *Bioresource Technology*, vol. 100, n.21, pp.4945–4954, 2009.
- [137] F. Van Foreest, “Perspectives for biogas in Europe”, Oxford: Oxford Institute for Energy Studies. 54p, 2012.

- [138] D. M. Fernandes, “Biomassa e biogás da suinocultura”, Parana: Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 209p., 2012.
- [139] A. C. R. Cavalcante, “Producción y utilización de forrajeras convencionales cultivadas en el Semiárido Brasileño”, em *La producción de rumiantes menores en las zonas áridas de Latinoamérica*, 1.<sup>a</sup> ed., L. I. Rojas, Ed. Brasilia-DF: EMBRAPA, 2013, pp.313–339.
- [140] Scientific Committee on Problems of the Environment - SCOPE, *Bioenergy & Sustainability: bridging the gaps*, 1.<sup>a</sup> ed. São Paulo: SCOPE 72. 779p., 2015.
- [141] D. de J. Ferreira, R. de P. Lana, A. de M. Zanine, E. M. Santos, C. M. Veloso, G. A. Ribeiro, “Silage fermentation and chemical composition of elephant grass inoculated with rumen strains of *Streptococcus bovis*”, *Animal Feed Science and Technology*, vol. 183, n.1–2, pp.22–28, Jun. 2013.
- [142] J. McEniry, E. Allen, J. D. Murphy, P. O’Kiely, “Grass for biogas production: The impact of silage fermentation characteristics on methane yield in two contrasting biomethane potential test systems”, *Renewable Energy*, vol. 63, pp.524–530, Mar. 2014.
- [143] A. C. do Rêgo, “Avaliação de silagens de capim elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.) com inclusão do farelo da vagem de algaroba (*Prosopis juliflora*)”, Lavras: Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Lavras. 81p., 2008.
- [144] L. G. R. Pereira, N. M. Rodriguez, L. C. Gonçalves, D. A. de A. Pires, “Jornada sobre Producción y Utilización de Ensilajes”, *EMBRAPA*, n.1979, pp.52–68, 2007.
- [145] H. Torres Muro, G. Quino Villanueva, “Diseño, construcción y evaluación de una cocina mejorada con intercambiador de calor”.
- [146] F. M. da Silva, J. de Lucas Junior, M. Benincasa, E. de Oliveira, “Desempenho de um aquecedor de água a biogás”, *Engenharia Agrícola*, vol. 25, n.3, pp.608–614, 2005.
- [147] A. Asmell, F. J. Cadavid, J. Carlos Ospina, “Análisis comparativos de eficiencia en cocción con gas natural y electricidad”, *Revista Facultad de Ingeniería*, pp.98–105, 2001.
- [148] M. von Lampe, D. B. Turley, H. Parry, R. Leybourn, *Bioheat, Biopower and Biogas*. OECD Publishing, 2010.
- [149] B. A. Berns, H.-P. Schnicke, P. Bombonatti, “Anteprojeto de uma usina de pesquisa e

- capacitação em biogás/Probiogás ; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ)”, Brasília-DF: Ministério das Cidades. 160p., 2015.
- [150] A. Pascual, B. Ruiz, P. Gomez, X. Flotats, B. Fernández, “Situación y potencial de generación de biogás. Estudio Técnico PER 2011-2020”, *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - IDAE*, Madrid: IDAE. 100p., p.100, 2011.
- [151] Naciones Unidas, “Protocolo de kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático”, *Protocolo de Kyoto*, Kyoto: CMNUCC, p.24, 1998.
- [152] BBC, “BBC - Brasil”, *Conferência do clima termina com «acordo histórico» contra aquecimento global*, 2015. Disponível em: <[http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/12/151212\\_acordo\\_paris\\_tg\\_rb](http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/12/151212_acordo_paris_tg_rb)>. Acesso em: 22 junho 2016.
- [153] (Organización de las Naciones Unidas) ONU, “Convención Marco sobre el Cambio Climático”, vol. 21930, p.40, 2015.
- [154] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, “Resolução Normativa N° 482/2012”, vol. 149, n.76, p.53, 2012.
- [155] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, “Resolução Normativa N° 687, de 24 de Novembro de 2015”, *Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST*, Brasília-DF: ANEEL, 2015.
- [156] IEA Bioenergy, *IEA Bioenergy Task 37 Country Reports Summary*. 2014.
- [157] T. Al Seadi, “Danish Centralised Biogas Plants”, *Plant Description*, Denmark: Bioenergy Department, University of Southern Denmark, pp.1–28, 2000.
- [158] M. Lantz, “The economic performance of combined heat and power from biogas produced from manure in Sweden – A comparison of different CHP technologies”, *Applied Energy*, vol. 98, pp.502–511, Out. 2012.
- [159] S. Karellas, I. Boukis, G. Kontopoulos, “Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n.4, pp.1273–1282, Mai. 2010.

- [160] J. Bacenetti, M. Negri, D. Lovarelli, L. Ruiz Garcia, M. Fiala, “Economic performances of anaerobic digestion plants: Effect of maize silage energy density at increasing transport distances”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 80, pp.73–84, Set. 2015.
- [161] S. a. Gebrezgabher, M. P. M. Meuwissen, B. A. M. Prins, A. G. J. M. O. Lansink, “Economic analysis of anaerobic digestion—A case of Green power biogas plant in The Netherlands”, *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, vol. 57, n.2, pp.109–115, Jun. 2010.
- [162] A. Akbulut, “Techno-economic analysis of electricity and heat generation from farm-scale biogas plant: Çiçekdağı case study”, *Energy*, vol. 44, n.1, pp.381–390, Ago. 2012.
- [163] J. A. C. Filho, “Biogás - Independência Energética do Pantanal Matogrossense”, *Circular Técnica n° 9 EMBRAPA*, EMBRAPA.. 53p., p.53, 1981.
- [164] C. A. V. B. de Sales, “Avaliação Técnico Econômica da Conversão da Biomassa em Eletricidade Utilizando Tecnologias de Gaseificação”, Itajubá: Dissertação de mestrado. Universidade Federal de itajubá. 172p., 2007.
- [165] Centro Internacional de Energias Renováveis–Biogás - CIBIOGAS, “BiogasMap”, *BiogasMAp*, 2016. Disponível em: <<http://mapbiogas.cibiogas.org/>>. Acesso em: 12 abril 2016.
- [166] F. Sgroi, A. M. Di Trapani, M. Foderà, R. Testa, S. Tudisca, “Economic performance of biogas plants using giant reed silage biomass feedstock”, *Ecological Engineering*, vol. 81, pp.481–487, 2015.
- [167] F. Sgroi, M. Foderà, A. M. Di Trapani, S. Tudisca, R. Testa, “Economic evaluation of biogas plant size utilizing giant reed”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp.403–409, Set. 2015.
- [168] P. H. Rathunde, “Viabilidade Econômica da Geração Distribuída do Biogás de Dejetos Animais no Município de Cruz Machado”, Curitiba: Dissertação de Mestrado. UNIFAE.139p., 2009.
- [169] M. Seppälä, A. Laine, J. Rintala, “Screening of novel plants for biogas production in northern conditions”, *Bioresource Technology*, vol. 139, pp.355–362, Jul. 2013.
- [170] Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB, “Manual do usuario do programa de computador Biogás: geração e uso energetico - efluentes e residuo rural -

- versão 1.0”, São Paulo: SMA, CETESB, MTC. 62p., 2006.
- [171] F. T. Ajayi, “Effects of feeding ensiled mixtures of elephant grass (*Pennisetum purpureum*) with three grain legume plants on digestibility and nitrogen balance of West African Dwarf goats”, *Livestock Science*, vol. 142, n.1–3, pp.80–84, Dez. 2011.
- [172] I. A. Dos Santos, “Emissões de gases de efeito estufa (gee) associadas à bovinocultura: o valor fertilizante do esterco e o impacto da biodigestão anaeróbia”, Itajubá: Universidade Federal de Itajubá. Dissertação.73p., 2012.
- [173] Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, “Acompanhamento da safra brasileira rio grande do sul: Grãos”, *Relatório Geral*, Porto Alegre: GEDES/SEGEO/RS., pp.1–5, 2015.
- [174] Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, “Formulacion de un programa basico de normalizacion para aplicaciones de energías alternativas y difusión «Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás»”, *Documento ANC-0603-19-01*, Bogota D.C.: UPME. 47p., 2003.
- [175] E. Galvani, “Unidades Climáticas Brasileiras: Climatologia I”, São Paulo.
- [176] C. A. T. Santana, “Diseño y seleccion de elementos para una planta de biogás”, Valdivia: Tesis de graduación. Universidad Austral de Chile. 74p., 2008.
- [177] L. B. Allegue, J. Hinge, “Biogas upgrading: Evaluation of methods for H<sub>2</sub>S removal”, Denmark: Danish Technological Institute. 31p., pp.1–31, 2014.
- [178] C. P. Samanez, *Engenharia econômica*, 1.<sup>a</sup> ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 210p., 2009.
- [179] N. C. Filho, B. H. Kopittke, *Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial*, 11.<sup>a</sup> ed. São Paulo: Atlas. 411p., 2010.
- [180] H. P. Gomes, *Avaliação econômica: eficiência energética*, 1.<sup>a</sup> ed. João Pessoa: UFPB. 100p., 2014.
- [181] L. Blank, A. Tarquin, *Engenharia econômica*, 6.<sup>a</sup> ed. São Paulo: McGraw-Hill. 756p., 2008.
- [182] H. Hirschfeld, *Engenharia econômica e análise de custos*, 7.<sup>a</sup> ed. São Paulo: Atlas. 519p.,

- 2013.
- [183] NTC&LOGÍSTICA, “Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas - 2014”, São Paulo: NTC. 80p., pp.1–80, 2014.
- [184] NTC&LOGÍSTICA, “Anuário NTC & Logística 2014/2015”, São Paulo: NTC. 79p., p.79, 2015.
- [185] C. M. C. Lazzarini, A. G. dos Santos, S. F. P. Saramago, C. A. Faria, “Modelo de otimização do transporte de cana-de-açúcar das frentes de corte para usinas”, em *VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, 2010, n.1, pp.1–10.
- [186] C. M. C. Lazzarini, “Modelagem e otimização da produção em usinas de açúcar e álcool”, Uberlândia: Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. 195p., 2012.
- [187] R. P. Overend, “The average haul distance and transportation work factors for biomass delivered to a central plant”, *Biomass*, vol. 2, n.1, pp.75–79, 1982.
- [188] M. Wright, R. C. Brown, “Establishing the optimal sizes of different kinds of biorefineries”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 1, n.3, pp.191–200, Nov. 2007.
- [189] B. M. Smyth, H. Smyth, J. D. Murphy, “Can grass biomethane be an economically viable biofuel for the farmer and the consumer?”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 4, n.5, pp.519–537, Set. 2010.
- [190] J. Leboreiro, A. K. Hilaly, “Biomass transportation model and optimum plant size for the production of ethanol”, *Bioresource Technology*, vol. 102, n.3, pp.2712–2723, Fev. 2011.
- [191] A. Sultana, A. Kumar, “Development of tortuosity factor for assessment of lignocellulosic biomass delivery cost to a biorefinery”, *Applied Energy*, vol. 119, pp.288–295, Abr. 2014.
- [192] L. M. Frare, M. L. Gimenes, N. C. Pereira, “Correlações para estimativas de custos na remoção de ácido sulfídrico de biogás”, *Acta Scientiarum. Technology*, vol. 28, n.1, pp.167–172, Mar. 2006.
- [193] N. R. da Silva, “Avaliação econômica de silagens de capim e de milho”, *Seminários*

*Aplicados do Programa de Pós- Graduação em Ciência Animal da Escola de Veterinária e Zootecnia da UFG, Goiânia: UFG, pp.1–17, 2011.*

- [194] R. C. do Amaral, T. F. Bernardes, “Qual é o real custo da silagem produzida?”, *Conservação de Forragens*, Brasil, pp.1–2, 2013.
- [195] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, “Leilão em energia elétrica”, *Primeiro leilão de geração de 2016 comercializa energia de 29 empreendimentos*, 2016. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset\\_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/primeiro-leilao-de-geracao-de-2016-comercializa-energia-de-29-empresendimentos/656877?inheritRedirect=false&redirect=http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa](http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/primeiro-leilao-de-geracao-de-2016-comercializa-energia-de-29-empresendimentos/656877?inheritRedirect=false&redirect=http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa)>. Acesso em: 30 abril 2016.
- [196] Prefeitura da cidade de São Paulo, “Ata do leilão de venda de Redução Certificada de Emissão - RCE”, *NOTICE Nº001/2012 - INSTRUMENT: 001/2012*, São Paulo: BM&FBOVESPA, 2012.
- [197] R. da S. Nicoloso, “Estudo Técnico da Destinação do Fertilizante Orgânico Sólido Produzido em uma Usina de Biogás no Município de Concórdia-SC”, *Embrapa*, Concórdia - SC: Embrapa Suínos e Aves. 54p, 2014.
- [198] H.-P. Schnicke, “Comercialização de subprodutos de uma planta de biogás/Probiogás ; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ)”, Brasília-DF: Ministério das Cidades. 470p., 2015.
- [199] OANDA, “Conversor de moedas”, *Conversor de moedas*, 2016. Disponível em: <<https://www.oanda.com/lang/pt/currency/converter/>>. Acesso em: 10 maio 2016.
- [200] D. J. Hills, “Effects of carbon: Nitrogen ratio on anaerobic digestion of dairy manure”, *Agricultural Wastes*, vol. 1, n.4, pp.267–278, Nov. 1979.
- [201] X. Wang, G. Yang, Y. Feng, G. Ren, X. Han, “Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw”, *Bioresource Technology*, vol. 120, pp.78–83, Set. 2012.
- [202] G. Esposito, “Bio-Methane Potential Tests To Measure The Biogas Production From The Digestion and Co-Digestion of Complex Organic Substrates”, *The Open*

- Environmental Engineering Journal*, vol. 5, n.1, pp.1–8, Jan. 2012.
- [203] K. J. Chae, A. Jang, S. K. Yim, I. S. Kim, “The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure”, *Bioresource Technology*, vol. 99, n.1, pp.1–6, 2008.
- [204] Y. Vögeli, C. Riu, A. Gallardo, S. Diener, C. Zurbrügg, *Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries*. 2014.
- [205] N. Yabe, “Environmental and economic evaluations of centralized biogas plants running on cow manure in Hokkaido, Japan”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 49, n.July 2012, pp.143–151, Fev. 2013.
- [206] SCHNELL, “Biogas CHP plants 100 to 500 kWel”, Wangen, Germany: SCHNELL, 2014.
- [207] 2G, “Biogas CHP Plants 20 to 4000 kWel”, Heek, Germany: 2G, 2015.
- [208] 2G, “Biogas CHP plants to 3000 kWel”, n.July, Heek, Germany: 2G, 2010.
- [209] IPCC 2014, “Summary for Policymakers”, em *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T. Z. and J. C. M. Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, Ed. Cambridge & New York: Cambridge University Press, 2014, pp.1–30.
- [210] D. L. Hartmann, A. M. G. Klein Tank, M. Ruscicucci, L. V. Alexander, B. Broenniman, Y. Charabi, F. J. Dentener, E. J. Dlugokencky, D. R. Easterling, A. Kaplan, B. J. Soden, P. W. Thorne, M. Wild, P. M. Zhai, “Observations: Atmosphere and Surface Supplementary Material”, em *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1.<sup>a</sup> ed., T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, e P. M. Midgley, Eds. Cambridge & New York: Cambridge University Press, 2013, pp.1–30.

## **ANEXO A. Base de dados de digestão anaeróbia**

## A1. Características das unidades de digestão anaeróbia no Brasil

| Nº | Estado             | Porte         | Produção média diária de biogás [m³/dia] | Categoria de unidade            | Fonte do substrato                  | Aplicação energética do Biogás | Situação da unidade |
|----|--------------------|---------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 1  | Tocantins          | Pequeno porte | 150                                      | Agropecuária                    | Avicultura de postura ou corte      | Elétrica                       | Em reforma          |
| 2  | Pernambuco         | Pequeno porte | 2.226                                    | Estação de Tratamento de Esgoto | Esgoto                              | Elétrica                       | Em construção       |
| 3  | Pernambuco         | Pequeno porte | 1.714                                    | Estação de Tratamento de Esgoto | Esgoto                              | Elétrica                       | Em construção       |
| 4  | Bahia              | Pequeno porte | 2.226                                    | Estação de Tratamento de Esgoto | Esgoto                              | Elétrica                       | Em construção       |
| 5  | Bahia              | Médio porte   | 4.810                                    | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 6  | Bahia              | Médio porte   | 12.000                                   | Aterro Sanitário                | Aterro sanitário                    | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 7  | Mato Grosso        | Pequeno porte | 1.210                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 8  | Mato Grosso        | Grande porte  | 28.233                                   | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica / Mecânica            | Em operação         |
| 9  | Mato Grosso        | Grande porte  | 20.000                                   | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 10 | Mato Grosso        | Médio porte   | 3.457                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica                        | Em operação         |
| 11 | Mato Grosso        | Pequeno porte | 1.200                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica / Mecânica            | Em operação         |
| 12 | Mato Grosso        | Pequeno porte | 2.500                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica / Mecânica            | Em operação         |
| 13 | Mato Grosso do Sul | Médio porte   | 3.025                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica                        | Em operação         |
| 14 | Mato Grosso do Sul | Médio porte   | 7.400                                    | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 15 | Mato Grosso do Sul | Grande porte  | 22.200                                   | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 16 | Mato Grosso do Sul | Grande porte  | 14.800                                   | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 17 | Mato Grosso do Sul | Grande porte  | 5.550                                    | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 18 | Goiás              | Pequeno porte | 237                                      | Agropecuária                    | Bovinocultura de leite ou corte     | Elétrica                       | Em operação         |
| 19 | Goiás              | Pequeno porte | 1.368                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em reforma          |

| Nº | Estado       | Porte         | Produção média diária de biogás [m³/dia] | Categoria de unidade            | Fonte do substrato                  | Aplicação energética do Biogás | Situação da unidade |
|----|--------------|---------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 20 | Goiás        | Pequeno porte | 200                                      | Estação de Tratamento de Esgoto | Esgoto                              | Elétrica                       | Em reforma          |
| 21 | Minas Gerais | Pequeno porte | 507                                      | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 22 | Minas Gerais | Pequeno porte | 913                                      | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Mecânica                       | Em operação         |
| 23 | Minas Gerais | Pequeno porte | 1.742                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Mecânica                       | Em operação         |
| 24 | Minas Gerais | Médio porte   | 2.709                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Mecânica                       | Em operação         |
| 25 | Minas Gerais | Grande porte  | 45.000                                   | Aterro Sanitário                | Aterro sanitário                    |                                | Em operação         |
| 26 | Minas Gerais | Pequeno porte | 182                                      | Agropecuária                    | Bovinocultura de leite ou corte     | Elétrica                       | Em operação         |
| 27 | Minas Gerais | Médio porte   | 5.520                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 28 | Minas Gerais | Médio porte   | 2.777                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 29 | Minas Gerais | Médio porte   | 4.000                                    | Agropecuária                    | Bovinocultura de leite ou corte     | Elétrica                       | Em construção       |
| 30 | Minas Gerais | Médio porte   | 7.656                                    | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 31 | Minas Gerais | Pequeno porte | 1.000                                    | Industria                       | Industria de laticínios             | Elétrica                       | Em operação         |
| 32 | Minas Gerais | Médio porte   | 4.080                                    | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 33 | Minas Gerais | Grande porte  | 120.000                                  | Aterro Sanitário                | Aterro sanitário                    | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 34 | Minas Gerais | Médio porte   | 12.430                                   | Estação de Tratamento de Esgoto | Lodo de esgoto                      | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 35 | Minas Gerais | Pequeno porte | 1.210                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 36 | Minas Gerais | Grande porte  | 14.500                                   | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 37 | Minas Gerais | Médio porte   | 5.760                                    | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 38 | Minas Gerais | Médio porte   | 10.372                                   | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 39 | Minas Gerais | Médio porte   | 7.000                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 40 | Minas Gerais | Pequeno porte | 700                                      | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Mecânica             | Em operação         |
| 41 | Minas Gerais | Médio porte   | 10.024                                   | Aterro Sanitário                | Aterro sanitário                    | Elétrica                       | Em operação         |
| 42 | Minas Gerais | Pequeno porte | 200                                      | Agropecuária                    | Bovinocultura de leite ou corte     | Elétrica                       | Em operação         |

| Nº | Estado         | Porte         | Produção média diária de biogás [m³/dia] | Categoria de unidade            | Fonte do substrato                  | Aplicação energética do Biogás | Situação da unidade |
|----|----------------|---------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 43 | Rio de Janeiro | Médio porte   | 11.500                                   | Aterro Sanitário                | Aterro sanitário                    | Mecânica                       | Em construção       |
| 44 | Rio de Janeiro | Grande porte  | 49.000                                   | Aterro Sanitário                | Aterro sanitário                    | Térmica                        | Em operação         |
| 45 | Rio de Janeiro | Grande porte  | 36.000                                   | Aterro Sanitário                | Aterro sanitário                    | Mecânica                       | Em construção       |
| 46 | São Paulo      | Médio porte   | 5.280                                    | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 47 | São Paulo      | Grande porte  | 360.000                                  | Aterro Sanitário                | Aterro sanitário                    | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 48 | São Paulo      | Grande porte  | 192.000                                  | Aterro Sanitário                | Aterro sanitário                    | Térmica / Elétrica             | Em construção       |
| 49 | São Paulo      | Grande porte  | 56.000                                   | Estação de Tratamento de Esgoto | Lodo de esgoto                      | Térmica                        | Em operação         |
| 50 | São Paulo      | Grande porte  | 114.000                                  | Aterro Sanitário                | Aterro sanitário                    | Elétrica                       | Em reforma          |
| 51 | São Paulo      | Grande porte  | 45.600                                   | Aterro Sanitário                | Aterro sanitário                    | Elétrica                       | Em construção       |
| 52 | São Paulo      | Médio porte   | 9.600                                    | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 53 | São Paulo      | Grande porte  | 60.960                                   | Industria                       | Industria suco energética           | Elétrica                       | Em construção       |
| 54 | São Paulo      | Pequeno porte | 173                                      | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em reforma          |
| 55 | São Paulo      | Médio porte   | 9.600                                    | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 56 | São Paulo      | Médio porte   | 2.880                                    | Co-digestão                     | Co-digestão de resíduos             | Elétrica                       | Em operação         |
| 57 | São Paulo      | Médio porte   | 8.000                                    | Estação de Tratamento de Esgoto | Lodo de esgoto                      | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 58 | São Paulo      | Médio porte   | 10.000                                   | Industria                       | Industria suco energética           | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 59 | São Paulo      | Médio porte   | 7.800                                    | Estação de Tratamento de Esgoto | Lodo de esgoto                      | Elétrica / Mecânica            | Em construção       |
| 60 | São Paulo      | Médio porte   | 4.080                                    | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 61 | São Paulo      | Pequeno porte | 20                                       | Co-digestão                     | Co-digestão de resíduos             | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 62 | São Paulo      | Pequeno porte | 30                                       | Co-digestão                     | Co-digestão de resíduos             | Térmica                        | Em operação         |
| 63 | São Paulo      | Pequeno porte | 20                                       | Co-digestão                     | Co-digestão de resíduos             | Térmica                        | Em construção       |
| 64 | São Paulo      | Médio porte   | 3.750                                    | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 65 | São Paulo      | Médio porte   | 2.920                                    | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |

| Nº | Estado    | Porte         | Produção média diária de biogás [m³/dia] | Categoria de unidade | Fonte do substrato                  | Aplicação energética do Biogás | Situação da unidade |
|----|-----------|---------------|--|----------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 66 | São Paulo | Médio porte   | 3.000                                    | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 67 | São Paulo | Médio porte   | 6.600                                    | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 68 | Paraná    | Médio porte   | 7.400                                    | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 69 | Paraná    | Grande porte  | 12.950                                   | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 70 | Paraná    | Médio porte   | 12.000                                   | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 71 | Paraná    | Grande porte  | 14.800                                   | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 72 | Paraná    | Médio porte   | 11.100                                   | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 73 | Paraná    | Médio porte   | 7.400                                    | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 74 | Paraná    | Médio porte   | 4.000                                    | Industria            | Industria suco energética           | Elétrica                       | Em operação         |
| 75 | Paraná    | Médio porte   | 11.100                                   | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 76 | Paraná    | Grande porte  | 14.400                                   | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 77 | Paraná    | Pequeno porte | 2.280                                    | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em construção       |
| 78 | Paraná    | Pequeno porte | 2.000                                    | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 79 | Paraná    | Médio porte   | 3.750                                    | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 80 | Paraná    | Pequeno porte | 99                                       | Agropecuária         | Bovinocultura de leite ou corte     | Térmica                        | Em operação         |
| 81 | Paraná    | Grande porte  | 16.650                                   | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 82 | Paraná    | Grande porte  | 14.000                                   | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 83 | Paraná    | Médio porte   | 7.400                                    | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 84 | Paraná    | Grande porte  | 20.000                                   | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 85 | Paraná    | Médio porte   | 3.000                                    | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 86 | Paraná    | Pequeno porte | 275                                      | Co-digestão          | Co-digestão de resíduos             | Térmica / Elétrica / Mecânica  | Em operação         |
| 87 | Paraná    | Médio porte   | 6.660                                    | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 88 | Paraná    | Médio porte   | 10.800                                   | Industria            | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |

| Nº  | Estado | Porte         | Produção média diária de biogás [m³/dia] | Categoria de unidade | Fonte do substrato                  | Aplicação energética do Biogás | Situação da unidade |
|-----|--------|---------------|--|----------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 89  | Paraná | Pequeno porte | 820                                      | Agropecuária         | Suinocultura                        | Térmica / Elétrica / Biometano | Em operação         |
| 90  | Paraná | Pequeno porte | 700                                      | Agropecuária         | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 91  | Paraná | Médio porte   | 4.393                                    | Agropecuária         | Suinocultura                        | Térmica / Mecânica             | Em operação         |
| 92  | Paraná | Pequeno porte | 194                                      | Agropecuária         | Suinocultura                        | Mecânica                       | Em operação         |
| 93  | Paraná | Pequeno porte | 500                                      | Agropecuária         | Suinocultura                        | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 94  | Paraná | Pequeno porte | 300                                      | Agropecuária         | Suinocultura                        | Térmica                        | Em operação         |
| 95  | Paraná | Médio porte   | 10.000                                   | Agropecuária         | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em construção       |
| 96  | Paraná | Pequeno porte | 1.025                                    | Agropecuária         | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em construção       |
| 97  | Paraná | Médio porte   | 3.457                                    | Agropecuária         | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 98  | Paraná | Pequeno porte | 516                                      | Agropecuária         | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em construção       |
| 99  | Paraná | Pequeno porte | 750                                      | Agropecuária         | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 100 | Paraná | Pequeno porte | 2.000                                    | Agropecuária         | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 101 | Paraná | Médio porte   | 4.700                                    | Agropecuária         | Suinocultura                        | Elétrica / Mecânica            | Em operação         |
| 102 | Paraná | Pequeno porte | 1.373                                    | Agropecuária         | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 103 | Paraná | Pequeno porte | 2.400                                    | Aterro Sanitário     | Aterro sanitário                    | Elétrica                       | Em operação         |
| 104 | Paraná | Pequeno porte | 1.200                                    | Agropecuária         | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 105 | Paraná | Pequeno porte | 1.440                                    | Agropecuária         | Bovinocultura de leite ou corte     | Elétrica                       | Em operação         |
| 106 | Paraná | Pequeno porte | 1.000                                    | Agropecuária         | Avicultura de postura ou corte      | Elétrica / Biometano           | Em operação         |
| 107 | Paraná | Grande porte  | 12.950                                   | Indústria            | Indústria de alimentos e/ou bebidas | Elétrica                       | Em operação         |
| 108 | Paraná | Pequeno porte | 1.450                                    | Agropecuária         | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 109 | Paraná | Pequeno porte | 1.700                                    | Indústria            | Abatedouro de aves ou suínos        | Térmica                        | Em operação         |
| 110 | Paraná | Pequeno porte | 2.400                                    | Indústria            | Abatedouro de aves ou suínos        | Térmica                        | Em operação         |
| 111 | Paraná | Pequeno porte | 1.729                                    | Agropecuária         | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |

| Nº  | Estado         | Porte         | Produção média diária de biogás [m³/dia] | Categoria de unidade            | Fonte do substrato                  | Aplicação energética do Biogás | Situação da unidade |
|-----|----------------|---------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 112 | Paraná         | Pequeno porte | 1.000                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 113 | Paraná         | Pequeno porte | 750                                      | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 114 | Paraná         | Pequeno porte | 520                                      | Co-digestão                     | Co-digestão de resíduos             | Biometano                      | Em reforma          |
| 115 | Paraná         | Pequeno porte | 50                                       | Estação de Tratamento de Esgoto | Esgoto                              | Elétrica                       | Em operação         |
| 116 | Paraná         | Pequeno porte | 1.000                                    | Co-digestão                     | Co-digestão de resíduos             | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 117 | Paraná         | Pequeno porte | 570                                      | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 118 | Paraná         | Médio porte   | 7.400                                    | Industria                       | Abatedouro de aves ou suínos        | Térmica                        | Em operação         |
| 119 | Paraná         | Grande porte  | 15.000                                   | Industria                       | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica                        | Em operação         |
| 120 | Santa Catarina | Pequeno porte | 1.400                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 121 | Santa Catarina | Pequeno porte | 2.000                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Elétrica             | Em construção       |
| 122 | Santa Catarina | Pequeno porte | 580                                      | Industria                       | Suinocultura                        | Térmica                        | Em reforma          |
| 123 | Santa Catarina | Pequeno porte | 1.543                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |
| 124 | Santa Catarina | Grande porte  | 30.657                                   | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Mecânica             | Em operação         |
| 125 | Santa Catarina | Médio porte   | 7.138                                    | Agropecuária                    | Industria de alimentos e/ou bebidas | Térmica / Mecânica             | Em operação         |
| 126 | Santa Catarina | Grande porte  | 44.944                                   | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 127 | Santa Catarina | Médio porte   | 9.609                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Mecânica             | Em operação         |
| 128 | Santa Catarina | Médio porte   | 9.426                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Mecânica             | Em operação         |
| 129 | Santa Catarina | Pequeno porte | 2.288                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Mecânica             | Em operação         |
| 130 | Santa Catarina | Pequeno porte | 2.000                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Elétrica             | Em operação         |
| 131 | Santa Catarina | Pequeno porte | 2.000                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Elétrica             | Em reforma          |
| 132 | Santa Catarina | Pequeno porte | 2.000                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Elétrica             | Em reforma          |
| 133 | Santa Catarina | Pequeno porte | 2.000                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Térmica / Elétrica             | Em reforma          |
| 134 | Santa Catarina | Médio porte   | 9.162                                    | Agropecuária                    | Suinocultura                        | Elétrica                       | Em operação         |

| Nº  | Estado            | Porte         | Produção média diária de biogás [m³/dia] | Categoria de unidade | Fonte do substrato              | Aplicação energética do Biogás | Situação da unidade |
|-----|-------------------|---------------|--|----------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 135 | Santa Catarina    | Médio porte   | 5.582                                    | Agropecuária         | Suinocultura                    | Elétrica                       | Em operação         |
| 136 | Santa Catarina    | Médio porte   | 12.480                                   | Aterro Sanitário     | Aterro sanitário                | Elétrica                       | Em operação         |
| 137 | Rio Grande do Sul | Pequeno porte | 240                                      | Agropecuária         | Suinocultura                    | Elétrica                       | Em operação         |
| 138 | Rio Grande do Sul | Pequeno porte | 160                                      | Agropecuária         | Suinocultura                    | Elétrica                       | Em operação         |
| 139 | Rio Grande do Sul | Pequeno porte | 10                                       | Agropecuária         | Bovinocultura de leite ou corte | Térmica                        | Em operação         |
| 140 | Rio Grande do Sul | Pequeno porte | 720                                      | Agropecuária         | Suinocultura                    | Elétrica                       | Em operação         |
| 141 | Rio Grande do Sul | Pequeno porte | 100                                      | Agropecuária         | Suinocultura                    | Elétrica                       | Em operação         |
| 142 | Rio Grande do Sul | Grande porte  | 138.000                                  | Aterro Sanitário     | Aterro sanitário                | Elétrica                       | Em construção       |
| 143 | Rio Grande do Sul | Médio porte   | 5.000                                    | Co-digestão          | Co-digestão de resíduos         | Térmica                        | Em operação         |
| 144 | Rio Grande do Sul | Grande porte  | 60.000                                   | Co-digestão          | Co-digestão de resíduos         | Biometano                      | Em construção       |
| 145 | Rio Grande do Sul | Pequeno porte | 1.700                                    | Co-digestão          | Co-digestão de resíduos         | Elétrica                       | Em operação         |
| 146 | Rio Grande do Sul | Grande porte  | 60.000                                   | Co-digestão          | Co-digestão de resíduos         | Biometano                      | Em operação         |
| 147 | Rio Grande do Sul | Pequeno porte | 140                                      | Agropecuária         | Suinocultura                    | Térmica                        | Em operação         |
| 148 | Rio Grande do Sul | Médio porte   | 3.000                                    | Co-digestão          | Co-digestão de resíduos         | Térmica / Elétrica / Biometano | Em operação         |
| 149 | Rio Grande do Sul | Grande porte  | 144.000                                  | Aterro Sanitário     | Aterro sanitário                | Elétrica                       | Em construção       |

Fonte: [165]

## A2. Rendimento específico de metano de diversos substratos

| Substrato/mistura de substratos                 | Rendimento específico de metano [m <sup>3</sup> /ton SV] | Rendimento específico de metano [m <sup>3</sup> /kg SV] | Referência |
|---|--|---|------------|
| Estrume: comida de cachorro: sorvete 50:25:25   | 467  | 0,467   | [117]      |
| Silagem de capim (sistema de percolação)        | 460  | 0,460   | [118]      |
| Alimentos para cães (fresco)                    | 427  | 0,427   | [117]      |
| Silagem de capim                                | 361  | 0,361   | [119]      |
| Estrume: óleo de 75:25                          | 361  | 0,361   | [117]      |
| Esterco de buffalo: silagem de milho 70:30      | 358  | 0,358   | [23]       |
| Dejetos líquidos suínos                         | 330  | 0,330   | [119]      |
| Silagem de capim (CSTR)                         | 330  | 0,330   | [118]      |
| Silagem de milho (batch mesofílico)             | 316  | 0,316   | [120]      |
| Silagem de capim                                | 315  | 0,315   | [121]      |
| Silagem de milho                                | 305  | 0,305   | [121]      |
| Silagem de milho                                | 296  | 0,296   | [117]      |
| Esterco bovino: silagem de capim 70:30          | 268  | 0,268   | [122]      |
| Esterco bovino líquido                          | 261  | 0,261   | [117]      |
| Silagem de capim (reatores de circuito fechado) | 260  | 0,260   | [118]      |
| Repolho (inteira)                               | 257  | 0,257   | [117]      |
| Estrume: soro 75:25                             | 252  | 0,252   | [117]      |
| Esterco bovino: silagem de capim 60:40          | 250  | 0,250   | [122]      |
| Esterco fresco                                  | 243  | 0,243   | [117]      |
| Estrume: soro 90:10                             | 238  | 0,238   | [117]      |
| Silagem de milho                                | 236  | 0,236   | [119]      |
| Estrume: switchgrass 75:25                      | 208  | 0,208   | [117]      |
| Estrume: batatas 75:25                          | 208  | 0,208   | [117]      |
| Silagem de capim (Batch)                        | 204  | 0,204   | [123]      |
| Esterco bovino: silagem de capim 80:20          | 178  | 0,178   | [122]      |
| Esterco bovino líquido: soro 75:25              | 168  | 0,168   | [117]      |
| Esterco bovino: silagem de capim 90:10          | 143  | 0,143   | [122]      |
| Switchgrass ( <i>Panicum virgatum</i> )         | 122  | 0,122   | [117]      |
| Lixiviados de milho                             | 107  | 0,107   | [117]      |

Fonte: [23,117,118,119,120,121,122,123]

## ANEXO B. Artigos e publicações relacionados ao trabalho de dissertação

### *Revistas:*

- [1] J. A. V. Piñas, O. J. Venturini, E. E. S. Lora, M. A. de Oliveira, O. D. C. Roalcaba, “Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb)”, *Revista Brasileira de Estudos de População*, vol. 33, n.1, p.175, Mai. 2016. ISSN: 1980-5519. DOI: <http://dx.doi.org/10.20947/S0102-309820160009>
- [2] J. A. V. Piñas, O. J. Venturini, E. S. Lora, “Digestão Anaeróbia como opção para tratamento esgotos em populações rurais no Brasil: Avaliação técnica e econômica”, *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, vol. 4, n.4, pp.13–30, Dez. 2015. ISSN: 2237-9711. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v4i4.44143>

### *Congressos:*

- [3] J. A. V. Piñas, O. J. Venturini, E. E. S. Lora, O. D. C. Roalcaba, “Análisis de Ciclo de Vida del uso de biodigestores domésticos rurales : enfoque en programas nacionales de biogás domestico”, em *7° encuentro de la RedBioLAC: Congreso Latinoamericano*, 2015, vol. 1, n.1, pp.1–8.
- [4] J. A. V. Piñas, O. J. Venturini, E. S. Lora, “Digestão Anaeróbia como opção para tratamento esgotos em populações rurais no Brasil: Avaliação técnica e econômica”, em *2° Seminario de Recursos Naturais: Sustentabilidade e tecnologias ambientais*, 2015, vol. 1, n.1, pp.1–13.
- [5] J. A. V. Piñas, O. J. Venturini, E. E. S. Lora, M. A. de Oliveira, “Geração de energia renovável em aterros sanitários: Estimativa da produção de Biogás e Energia utilizando os modelos LandGEM (EPA) e BIOGÁS (CETESB)”, em *10° Congresso Internacional de Bioenergia*, 2015, pp.1–6.