CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PRODUÇÃO DE BIOELETRICIDADE EM SISTEMA BIOGÁS-GÁS DE SÍNTESE A PARTIR DE RESÍDUOS DE MANDIOCA: VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Leonardo Choté de Castro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador:
Ronney Arismel Mancebo Boloy

Rio de Janeiro
Abril de 2021

PRODUÇÃO DE BIOELETRICIDADE EM SISTEMA BIOGÁS-GÁS DE SÍNTESE A PARTIR DE RESÍDUOS DE MANDIOCA: VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Leonardo Choté de Castro

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professor Dr. Ronney Arismel Mancebo Boloy (CEFET/RJ) (orientador)

_____

Professora Dra. Vanessa de Almeida Guimarães (CEFET/RJ)

_____

Professor Dr. Marcelo Borges Rocha (CEFET/RJ)

_____

Professora Dra. Adela Tatiana Rodriguez Chaparro (UMNG/Colômbia)

Rio de Janeiro

Abril de 2021

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

C355 Castro, Leonardo Choté de
Produção de bioeletricidade em sistema biogás-gás de síntese a partir de resíduos de mandioca: viabilidade técnica e econômica / Leonardo Choté de Castro – 2021.
102f. : il. color. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2021.
Bibliografia : f. 92-102
Orientador: Ronney Arismel Mancebo Boloy

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Recursos naturais renováveis. 3. Biomassa vegetal. 4. Bioeletricidade. 5. Estudos de viabilidade.I. Boloy, Ronney Arismel Mancebo (Orient.). II. Título.

CDD 333.794

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 nº 5281

AGRADECIMENTO

A Deus, por me dar saúde, sabedoria e paz de espírito para enfrentar os desafios da vida.

Aos meus pais e minha irmã, que me incentivaram e estiveram ao meu lado nos momentos bons e ruins, me ajudando a construir tudo o que tenho até hoje.

Ao meu orientador, professor Ronney, por confiar no meu trabalho e me incentivar a dar sempre o meu melhor.

A todos os professores que contribuíram para meu aprendizado e minha evolução durante o mestrado.

A todos os amigos que fiz durante esse processo, que me ajudaram a enfrentar todos os desafios de forma mais leve.

RESUMO

Produção de Bioeletricidade em Sistema Biogás-Gás de Síntese a partir de Resíduos de Mandioca: Viabilidade Técnica e Econômica

O objetivo deste estudo é avaliar técnica e economicamente um sistema de produção de bioeletricidade, alimentado simultaneamente por biogás e por gás de síntese em diferentes proporções. O sistema é composto por um biodigestor e um gaseificador de biomassa, integrados a um sistema de geração de energia elétrica de pequeno porte, capaz de fornecer eletricidade e atender à demanda de uma população isolada de 200 habitantes, que não possui acesso à rede elétrica. O biogás e o gás de síntese são produzidos a partir da manipueira e do bagaço, resíduos líquido e sólido da mandioca, que são utilizados como biomassa para gerar bioenergia no sistema proposto. Foi realizado um panorama das tendências associadas às publicações encontradas na literatura dos últimos 10 anos, na base do Scielo e do Web of Science, sobre a geração de energia elétrica a partir dos resíduos da mandioca. Associado com esta análise foi desenvolvido um estudo para avaliar um sistema que possua capacidade de produção de bioeletricidade para atendimento da demanda por energia da população isolada. Nesta análise foi possível calcular as vazões de biomassas e biocombustíveis necessárias, bem como os custos de eletricidade gerados pelo sistema, de forma a discutir sua viabilidade técnica-econômica. Os resultados do panorama demonstraram que dentre os resíduos da mandioca, a fécula e a manipueira são os de maior destaque e que o biogás é o biocombustível mais estudado quando se trata da valorização energética dos resíduos da mandioca. O panorama também demonstrou que o Brasil é o país com o maior número de artigos publicados dentro do período analisado. O resultado da avaliação proposta sugere o emprego de um sistema capaz de alimentar um motor gerador de energia elétrica de capacidade 50kW, necessário para suprir a demanda da população local. Os resultados obtidos a partir da análise energética mostram que o sistema proposto é capaz de fornecer a eletricidade demandada pela população em 3 cenários, considerando diferentes proporções nas vazões de biogás e gás de síntese. O cenário 2, que apresentou o melhor resultado, onde se considera a energia suprida pelo biogás em 50 % e do gás de síntese em 50 %, se fez necessário um consumo de 9,27 m^3/h para o biogás e 22,23 m^3/h para o gás de síntese. Em uma análise de sua eficiência global, para o cenário 2, o sistema proposto atingiu 72,2%. A respeito do estudo da viabilidade econômica, observou-se que para 3 cenários, considerando taxa de juros de 4 % a.a, 8 % a.a, e 12 % a.a, o investimento se torna viável a partir do sexto ano, quando o investimento inicial é pago e começa a gerar receita. A partir da análise econômica realizada, também foi possível constatar que o custo de produção de eletricidade no sistema biogás-gás de síntese, considerando um período de amortização de 10 anos, se situa entre 0,4614 US$/kWh e 0,1007 US$/kWh, valores que, quando comparados com outros da literatura e com as tarifas praticadas no país, se mostram coerentes e atrativos.

Palavras-chave: Bioenergia; Bioeletricidade; Mandioca; Biogás; Gás de síntese.

ABSTRACT

The objective of this study is to technically and economically evaluate a bioelectricity production system, fed simultaneously by biogas and syngas in different proportions. The system is composed of a biodigester and a biomass gasifier, integrated with a small electric power generation system, capable of supplying electricity of an isolated population of 200 inhabitants, who do not have access to the electricity grid. Biogas and syngas are produced from manioc and bagasse, liquid and solid residues from cassava, which are used as biomass to generate bioenergy in the proposed system. An overview of the trends associated with the publications found in the literature of the last 10 years, on the generation of electric energy from cassava residues was performed. Associated with this analysis was developed a study to evaluate a system that has the capacity to produce bioelectricity to meet the energy demand of the isolated population. In this analysis it was possible to calculate the biomass and biofuel flows needed, as well as the electricity costs generated by the system, in order to discuss its technical and economic feasibility. The results of the overview demonstrated that biogas is the most studied biofuel when it comes to energy recovery from cassava residues and that Brazil is the country with the largest number of published articles within the analyzed period. The result of the proposed sizing suggests the employment of a system capable of powering an electric motor generator of 50kW capacity. The results obtained from the energetic analysis show that the proposed system is capable of supplying the electricity demanded by the population in 3 scenarios, considering different proportions in the biogas and syngas flow rates. The scenario 2, which presented the best result, where the energy supplied by the biogas is considered at 50% and the synthesis gas at 50%, required a consumption of 9.27 m³/h for biogas and 22.23 m³/h for synthesis gas. In an analysis of its global efficiency, for scenario 2, the proposed system reached 72.2%. Regarding the economic viability study, it was observed that for three scenarios, considering interest rates of 4% p.a., 8% p.a., and 12% p.a., the investment becomes viable after the sixth year, when the initial investment is paid off and begins to generate revenue. From the economic analysis carried out, it was also possible to verify that the cost of producing electricity in the biogas-synthesis gas system, considering an amortization period of 10 years, is between 0.4614 US$/kWh and 0.1007

US$/kWh, values that, when compared with others in the literature and with the tariffs practiced in the country, are coherent and attractive.

Keywords: Bioenergy; Bioelectricity; Cassava; Biogas; Syngas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico matriz elétrica mundia. 17
Figura 2 - Gráfico matriz elétrica brasileira 18
Figura 3 - Etapas da digestão anaeróbica 20
Figura 4 - Principais etapas da gaseificação da biomassa 24
Figura 5 - Esquema de um gaseificador contracorrente 26
Figura 6 - Esquema de um gaseificador concorrente 27
Figura 7 - Remoção do alcatrão pelo método primário 31
Figura 8 - Remoção do alcatrão pelo método secundário 31
Figura 9 - Motor de combustão interna 33
Figura 10- Etapas ciclo otto 34
Figura 11- Quantidade de artigos publicados por país 48
Figura 12- Evolução da produção de artigos no período de 2010 a 2019 49
Figura 13 – Resíduos da mandioca mais estudados no período de 2010 a 2019 50
Figura 14 – Biocombustíveis obtidos a partir de resíduos de mandioca 51
Figura 15 – Metodologia 53
Figura 16 - Vila União 54
Figura 17 - Sistema de geração de bioenergia proposto 58
Figura 18 - Volumes de controle e pontos do sistema 60
Figura 19 - Vazão mássica de combustível 61
Figura 20 - Demanda de biomassa disponível x necessária 77
Figura 21 - Custo da eletricidade produzida pelos subsistemas para um período de funcionamento de 7027 horas/ano 81
Figura 22 - Custo da eletricidade produzido pelo sistema biogás-gás de síntese para um período de funcionamento de 7027 horas/ano 83
Figura 23 - Receita Anual esperada no sistema de geração biogás-gás de síntese 84
Figura 24 - Custos de energia elétrica do sistema a biogás-gás de síntese x tarifas utilizadas no Brasil 86
Figura 25 - Custos de energia do sistema biogás-gás de síntese e valores da literatura 88
Figura 26 - Custos de energia do sistema biogás-gás de síntese e média dos valores da literatura 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - ODS da Agenda 2030 x Objetivos do trabalho proposto 15
Tabela 2 - Composição média do biogás para diferentes tipos de biomassa 19
Tabela 3 - Requisitos do gás de síntese para a sua utilização como combustível em diferentes acionadores primários 21
Tabela 4 - Produção brasileira de mandioca 34
Tabela 5 – Composição química da manipueira 36
Tabela 6 - Aplicação de biogás enriquecido com hidrogênio em MCI 45
Tabela 7 - Considerações adotadas no sistema proposto 55
Tabela 8 - Dados técnicos do motor Deutz ND68D5 56
Tabela 9 - Dados técnicos do misturador Huaxin 56
Tabela 10 - Dados técnicos do Suiry purificador de biogás 56
Tabela 11 - Dados técnicos do biorreator 57
Tabela 12 - Dados técnicos do gaseificador 57
Tabela 13- Composição (gás de síntese) 70
Tabela 14 - Composição (biogás) 70
Tabela 15 - Valores adotados no cálculo da vazão 71
Tabela 16 - Vazão combustível e energia 73
Tabela 17 - Vazão mássica 74
Tabela 18 - Resultado da análise energética do sistema 75
Tabela 19 - Resultado da eficiência global do sistema 77
Tabela 20 - Valores adotados análise econômica 78
Tabela 21 - Valores referente ao investimento da planta 79
Tabela 22 - Custos de eletricidade planta biogás 80
Tabela 23 - Custos de eletricidade planta syngas 81
Tabela 24 - Custos de eletricidade planta biogás-syngas 83
Tabela 25 – Projeção do retorno do investimento inicial para os cenários propostos 85
Tabela 26 – Custos de energia encontrados na literatura 87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP – Agência Nacional do Petróleo

C_{elS} = Custo da energia elétrica produzida no sistema [US$/kWh]

$C_{manipeuira}$ - Custo da manipueira [US$/kWh]

$C_{bagaço}$ - Custo do bagaço [US$/kWh]

C_{manB} - Custo de manutenção do subsistema a biogás [US$/kWh]

C_{manGS} - Custo de manutenção do gaseificador [US$/kWh]

$C_{manMotor}$ = Custo de manutenção do motor [US$/kWh]

Cp - kJ/Kg °K

CH_4 - Metano

CO_2 – Dióxido de carbon

CO - Monóxido de carbono

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DA - Digestão anaeróbia

Dh – Diferença de entalpia [kJ/kg]

EPE - Empresa de pesquisa energética

$E_{ssyngas}$ - Potência suprida pelo syngas [kWh]

$E_{sbiogas}$ - Potência suprida pelo biogás [kWh]

E_{comb} – Energia suprida pela biomassa [kWh]

f: Fator de anuidade

FP_B = Fator de ponderação para o biogás produzido

FP_{Gs} = Fator de ponderação para o gás de síntese produzido

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

GEE - Gases do efeito estufa

h_b - Entalpia da Biomassa [kJ/kg]

h_g, h_a - Entalpia do gás e do ar [kJ/kg]

h_{cen} - Entalpia da cinzas, [kJ/kg]

H - Período equivalente de utilização [horas/ano]

H_2S – Gás sulfídrico

H_2 – Hidrogênio

ISO – *International Organization for Standardization*

I_{pb} – Investimento da planta de biogás [US$]

I_{pgs} – Investimento da planta de gás de síntese [US$]

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH - Índice de desenvolvimento humano

N_2 – Nitrogênio

NOx - Óxidos de nitrogênio

MACI - Motor Alternativo de Combustão Interna

MCI – Motor de Combustão Interna

MJ – Megajoules

$\dot{m}_e$ – Vazão massica de entrada [kg/s]

$\dot{m}_s$ – Vazão mássica de saída [kg/s]

m_b - Fluxo de biomassa que entra ao gaseificador [kg/h]

m_g- Fluxo de gás produzido na gaseificação [kg/h]

m_a - Fluxo de ar introduzido ao gaseificador [kg/h]

m_{cen} - Fluxo de cinzas [kg/h]

O_2 - Oxigênio

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCI_{Syngas} – Poder Calorifico Inferior do syngas [kJ/kg]

PCI_{Biogas} - Poder Calorifico Inferior do biogás [kJ/kg]

pH – Potencial hidrogeniônico

Ps – Porcentagem para potência suprida pelo syngas

Pb - Porcentagem para potência suprida pelo biogás

T_{el} = Tarifa da eletricidade da concessionária local [US$/kWh]

SUMÁRIO

1. **Introdução** **14**

1.1 Objetivo 16

1.1.2 Incentivos legais 17

1.2 Estrutura 19

2. **Biocombustíveis** **20**

2.1 Biogás 22

2.1.2 Etapas de produção do biogás 23

2.2 Gás de síntese 26

2.2.2 Tecnologias e processo de produção do gás de síntese 27

2.2.3 Tipos de gaseificadores 29

3. **Utilização da Biomassa na produção de Biocombustível** **32**

3.1 Mandioca 32

3.1.2 Produção de biocombustíveis e geração de bioenergia a partir do aproveitamento dos resíduos da mandioca 33

3.2 Produção de biogás a partir da manipueira 34

3.3 Produção de gás de síntese a partir do bagaço da mandioca 36

4. **Motores de Combustão Interna** **39**

4.1 Aplicação de biogás em motores de combustão interna 41

4.2 Aplicação de syngas em motores de combustão interna 42

4.3 Aplicação de biogás e syngas em motores de combustão interna 43

5. **Uso de resíduos da mandioca como biomassa** **46**

5.1 Panorama nacional e internacional 46

6. **Metodologia** **51**

6.1 Classificação da pesquisa 51

6.2 Metodologia e materiais 51

6.3 Dimensionamento da demanda energética 53

6.4 Considerações adotadas para o sistema proposto 54

6.5 Sistema proposto 56

6.6 Análise energética do sistema 58

6.7.1 Cálculo da vazão de ar no MCI 61

6.7.2 Cálculo da vazão de biocombustível 62

6.7.3 Metodologia para cálculo do PCI do gás de síntese 63
6.7.4 Eficiência global do sistema 64
6.8 Análise econômica do sistema 64
6.8.1 Receita anual esperada 68
7. **Resultados e Discussão** **69**
7.1 Resultado da análise dos gases produzidos 69
7.2 Resultado da análise energética 70
7.2.1 Considerações adotadas para a análise energética 70
7.2.2 Vila União: Demanda energética 71
7.2.3 Vazão mássica de combustível e biomassa 72
7.3 Resultado da eficiência global do sistema 76
7.4 Resultado da Análise Econômica 77
7.4.1 Considerações adotadas para a análise econômica 77
7.4.2 Análise dos subsistemas 79
7.4.3 Análise do sistema biogás-gás de síntese 81
7.4.4 Resultado da receita anual (*payback*) 83
7.4.5 Comparação dos resultados com a literatura 85
8. **Considerações Finais** **89**
8.1 Limitações da pesquisa 90
8.2 Sugestões de trabalhos futuros 91
Referências **93**

1. Introdução

O crescente desenvolvimento social e tecnológico, acompanhado pelo crescimento da população mundial, resultou em um aumento na demanda de energia e consequentemente em um aumento da poluição. Essa energia, obtida principalmente dos combustíveis fósseis como o petróleo e o carvão mineral, deu base para o crescimento e a transformação da economia mundial. Contudo, o início do século XXI trouxe mudanças no cenário, principalmente quanto a necessidade de um desenvolvimento sustentável (CISCO *et al*., 2020).

Observado principalmente em países desenvolvidos, o crescimento econômico impacta em um aumento do consumo de energia mundial, trazendo à tona a necessidade de as fontes tradicionais serem substituídas por recursos menos agressivos ao meio ambiente. No início dos anos 90, cientistas já alertavam para os impactos ambientais negativos provocados pela ação humana. Nos últimos 150 anos, a temperatura média global aumentou em cerca de 0,7 °C. Esse aumento está sendo atribuído a intensificação do efeito estufa pelas atividades antrópicas, como queima de combustíveis fósseis, que emitem dióxido de carbono (CO_2), liberado nos processos de combustão dos recursos fósseis para produção de calor, vapor ou energia elétrica (MAZZAROTTO, 2019).

Neste cenário, iniciou-se um investimento em energias alternativas renováveis, por parte da maioria dos países desenvolvidos e subdesenvolvidos, de forma que estas tenham uma participação significativa em sua matriz energética. Nesta busca por fontes alternativas, o Brasil apresenta um diferencial em relação a outros países, pois sua biodiversidade permite a geração de energia por diversos meios, incluindo as fontes de energia renováveis, como a hidroelétrica, e também, permite a busca pelo desenvolvimento de fontes alternativas como a utilização da biomassa, para produção de combustíveis renováveis, como o álcool, o biodiesel, biogás, entre outros (CEPEA, 2016).

Segundo a Abiogás (2020), o Brasil é o maior país em potencial de produção de biogás do mundo, o que torna o gás uma importante alternativa na geração de energia para o país. Ademais, o gás de síntese é um outro biocombustível que vem ganhando destaque no cenário mundial e nacional. O gás de síntese, também conhecido como

syngas, é uma mistura combustível de gases, obtido através da gaseificação. O processo de gaseificação pode ser considerado uma alternativa viável e sustentável, com o objetivo de produzir um combustível gasoso com melhores características de transporte, melhor eficiência de combustão e também, que possa ser utilizado como matéria-prima para outros processos (OKAMURA *et al*., 2016).

Assim, tendo a gaseificação e a digestão anaeróbica como processos para obtenção do gás de síntese e do biogás, a biomassa aparece como fonte de alimentação para o processo de obtenção de biocombustível. A biomassa pode ser definida como qualquer material orgânico, de origem vegetal e animal, que possa ser transformado em energia, seja ela energia térmica, mecânica ou elétrica (TORRES, 2017).

Como exemplo de biomassa, estão os resíduos agrícolas, a madeira e as plantas, como a cana-de-açúcar, o eucalipto e a beterraba, colhidos com objetivo de produzir energia, esses são os exemplos mais comuns (COPEL, 2016).

Nesse cenário, a biomassa a partir da mandioca se destaca, tendo vantagens quando comparada com outras culturas. A mandioca pode crescer em áreas onde o solo foi degradado e tem o rendimento mais elevado de hidrato de carbono por hectare, com exceção da cana-de-açúcar e da beterraba (CONTE JR *et al*., 2010).

Ademais, o Brasil é o maior produtor de mandioca da América Latina e o quarto maior do mundo, atrás apenas da Nigéria, da Tailândia e da Indonésia. Em 2018, o Brasil produziu 20,940 milhões de toneladas de mandioca, o que representa mais de 50 % de toda a produção da América Latina (FAO, 2018).

Dessa forma, a mandioca se apresenta como uma alternativa no uso de biomassa para geração de bioenergia no Brasil, pois além de sua importância como fonte de energia limpa, tem o país como um dos principais produtores.

Embora no Brasil exista uma oferta de energia elétrica e uma matriz energética mais sustentável, ainda há regiões que sofrem com problemas de acesso à energia no país. De acordo com o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), em um estudo publicado em 2020, cerca de 99,05 % da população possui acesso à eletricidade e 0,95 % do restante, está localizada em comunidades remotas na região Norte do país. A geração de eletricidade na região Norte do país é feita por sistemas isolados, que utilizam em sua maioria combustíveis fósseis como matéria-prima em geradores a diesel ou a gasolina, nem sempre sendo a solução mais adequada (IEMA, 2020). Não ter acesso à energia

elétrica afeta de forma negativa a qualidade da vida das pessoas, pois ter acesso à eletricidade implica ter o direito de consumir outros bens que dependem dessa fonte de energia (NADAUD, 2012).

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar técnica e economicamente um sistema de produção de bioeletricidade, alimentado simultaneamente por biogás e por gás de síntese em diferentes proporções. O sistema é composto por um biodigestor e por um gaseificador de biomassa, integrados a um sistema de geração de energia de pequeno porte, capaz de fornecer eletricidade e atender à demanda de uma população isolada, que não possui acesso à rede de distribuição de energia elétrica.

A população escolhida para fins deste estudo se encontra no estado de Roraima, situado na região Norte do país, local escolhido pelo seu potencial agrícola, sobretudo no cultivo da mandioca e pelas dificuldades atuais quanto ao acesso à eletricidade. Situada em Vila União, a população isolada é composta de 200 habitantes que não possuem acesso à rede elétrica. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Roraima produz mensalmente uma média de 170.000 toneladas de mandioca (IBGE, 2020). Ademais, Roraima teve sua energia fornecida pela Venezuela desde 2001, por ser o único estado do país fora do Sistema Interligado Nacional (SIN), dependendo durante anos do país vizinho. Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), desde 2019 a Venezuela deixou de enviar energia a Roraima, aumentando os gastos com o abastecimento de energia, proveniente de termoelétricas locais (MME, 2020).

A pesquisa e o estudo da produção e da utilização de bioenergia a partir da biomassa, como uma fonte alternativa de energia, agrega de forma positiva no cenário acadêmico atual, pois, além de ser mais uma opção energética, é uma tecnologia renovável. A utilização da biomassa na cadeia produtiva reforça mais a importância na diminuição do impacto ambiental, já que a utilização de resíduos da cultura agrícola na produção diminuem a poluição do meio ambiente, pois quando o descarte é feito de forma

inadequada, alguns tipos de lixo agrícola podem causar danos ao meio ambiente, como a poluição da água dos rios e do solo, causando prejuízos à vegetação e aos animais.

1.1.2 Incentivos legais

Os incentivos legais para a construção de biodigestores e gaseificadores no Brasil começam com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que estabelece uma ordem de prioridade na gestão e no gerenciamento de resíduos sólidos.

O surgimento da PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos), criada com base na lei 12.305/2010, determina que na gestão e no gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Ela também estabelece que poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental.

Ademais, o surgimento da Agenda 2030, criada em 2015 por representantes dos 193 Estados-membros da ONU, propõe 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas para erradicar a pobreza e promover vida digna para todos, dentro dos limites do planeta (Agenda 2030, 2020). Dentre os 17 ODS, quatro estão alinhados diretamente e oito, indiretamente, com o objetivo do trabalho proposto. Os 17 ODS da Agenda 2030 e sua correlação com os objetivos do trabalho proposto estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: 17 ODS da Agenda 2030 x Objetivos do trabalho proposto
Categoria de avaliação

17 ODS	Diretamente	Indiretamente	N/A
Erradicação da Pobreza		x	
Fome Zero e Agricultura Sustentável		x	
Saúde e Bem-Estar		x	
Educação de Qualidade		x	
Igualdade de Gênero			x
Água Potável e Saneamento		x	
Energia Acessível e Limpa	x		
Trabalho Decente e Crescimento Econômico		x	
Indústria, Inovação e Infraestrutura		x	
Redução das Desigualdades		x	
Cidades e Comunidades Sustentáveis	x		
Consumo e Produção Responsável	x		
Ação contra a Mudança Global do Clima	x		
Vida na Água		x	
Vida Terrestre			x
Paz, Justiça e Instituições Eficazes			x
Parcerias e Meios de Implementação			x

Fonte: Autoria própria com base nos dados da AGENDA 2030.

Por meio da Tabela 1, foi possível verificar que, dentre os 17 ODS, os que possuem relação direta e indireta com o objetivo do trabalho proposto são: energia acessível e limpa, cidades e comunidades sustentáveis, consumo e produção responsável, ação contra a mudança global do clima, erradicação da pobreza, fome zero e agricultura sustentável, saúde e bem-estar, educação de qualidade, trabalho decente e crescimento econômico, indústria, água potável e saneamento, inovação, infraestrutura e redução das desigualdades.

Sendo assim, os ODS apresentados na Tabela 1 reforçam a importância do objetivo do trabalho proposto, onde ter energia acessível e limpa é um dos principais objetivos a serem atingidos em todo o planeta.

1.2 Estrutura

A proposta de dissertação de mestrado está constituída das seguintes etapas: introdução, contendo contextualização, objetivo, incentivos legais e estrutura, em seguida um capítulo referente aos biocombustíveis em questão. No capítulo 3 é apresentada uma análise referente a utilização da biomassa na produção de biocombustível. O capítulo 4 é referente aos motores de combustão interna e suas aplicações. O capítulo 5 apresenta um panorama nacional e internacional sobre o uso de resíduos da mandioca como biomassa. No capítulo 6, são apresentados os métodos utilizados para se atingir o objetivo proposto no estudo. O capítulo 7 apresenta os resultados da análise energética e econômica do sistema proposto. Por fim, o capítulo 8 apresenta as considerações finais e contribuições deste trabalho, além de sugestões de propostas futuras para novos estudos e limitações da pesquisa realizada.

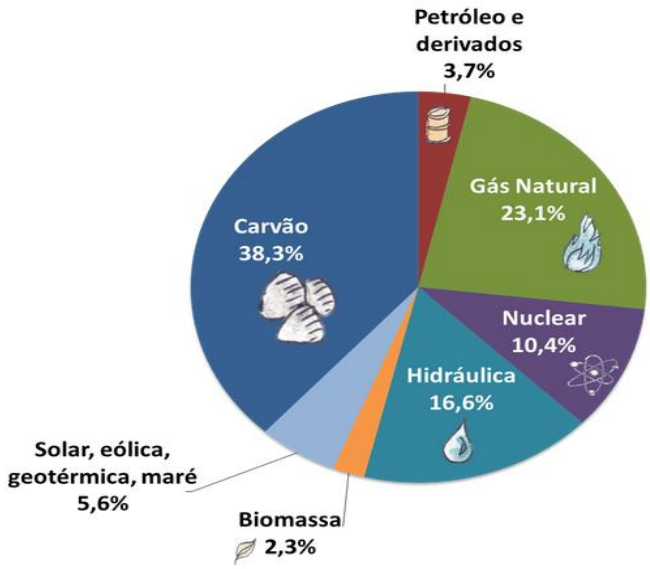
2. Biocombustíveis

A utilização de biocombustíveis como fonte alternativa de energia, vem ganhando cada vez mais destaque no cenário atual devido ao custo dos combustíveis fósseis e a importância de preservação do meio ambiente, com a necessidade de reduzir as emissões dos gases de efeito estufa. Ainda, segundo Schenk (2018), além das energias alternativas como solar, eólica e geotérmica, tem-se a energia gerada a partir da biomassa que pode ser convertida em biocombustíveis como o bioetanol, biogás, biodiesel e gás de síntese.

Dentre as tecnologias de conversão energética da biomassa, para uso em pequena e grande escala, podem-se destacar a gaseificação, método de produção de calor e eletricidade (cogeração), recuperação de energia de resíduos sólidos urbanos e aterros sanitários, além de biocombustíveis (GOLDEMBERG, 2008).

A Figura 1 apresenta a matriz elétrica mundial, segundo estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2019, com ano base 2018.

Figura 1: Matriz elétrica mundial



Fonte: EPE (2019)

A matriz elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica em um país, estado ou no mundo. A geração de energia elétrica

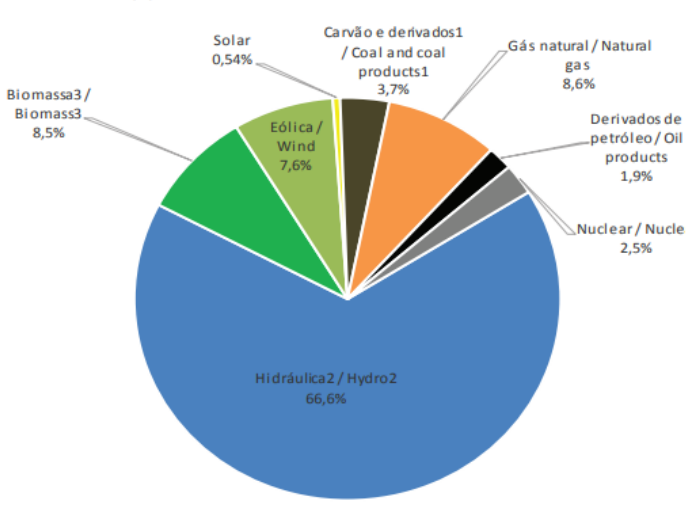
no mundo é composta principalmente por combustíveis fósseis como carvão, óleo, gás natural e também, hidroelétricas (EPE, 2019).

É possível observar, a partir da Figura 1, que a maior parte da matriz elétrica mundial é composta por carvão (38,3 %), seguida de gás natural (23,1 %), de hidráulica (16,6 %) e de nuclear (10,4 %). O petróleo representa uma pequena parcela de 3,7 %. As demais fontes correspondem a um total de 8 %, onde 5,6 % são referentes a energia solar, a eólica, a geotérmica e a marés, e 2,3 % são referentes a biomassa.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019), a matriz elétrica brasileira possui 66,6 % de sua energia gerada por usinas hidroelétricas, acompanhada de 8,6 % do gás natural e de 8,5 % da biomassa, além de um crescimento considerável da energia eólica, atingindo 7,6 % da matriz, como observado na figura 2.

A Figura 2 apresenta a matriz elétrica brasileira, segundo estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2019, com ano base 2018.

Figura 2: Matriz elétrica brasileira



Fonte: EPE (2019)

Analisando a matriz energética brasileira, é possível observar que a parte hidráulica corresponde a mais da metade da matriz (67 %). Outras fontes renováveis como a biomassa e a eólica, correspondem a 16 % da matriz. Quando analisado, a Figura 2 demonstra que a matriz energética brasileira é mais renovável que a mundial, possuindo em sua maioria fontes renováveis.

Observou-se que o gás natural, presente nas Figuras 1 e 2 acima, aparece com 23 % e 9 % respectivamente, na matriz energética mundial e na nacional. O gás natural, mesmo possuindo algumas vantagens como uma combustão mais limpa quando comparado a outros combustíveis fósseis e, uma maior facilidade de transporte e manuseio, é considerado uma fonte de energia não renovável, por poder se esgotar um dia na natureza (MAZZAROTTO *et al.*, 2019).

Nesse cenário, por ser uma fonte de energia renovável e limpa, o biogás é tido como uma fonte promissora para um futuro sustentável e um potencial substituto para o gás natural (MILANEZ *et al*., 2020). Segundo Milanez, o biogás pode ser produzido de forma natural ou por meio da digestão anaeróbica e possui vantagens como a facilidade de estoque a baixo custo e uma menor emissão dos gases do efeito estufa (GEE) para o meio ambiente.

As seções 2.1 e 2.1.2 apresentam a definição de biogás, sua composição e suas respectivas etapas de produção.

2.1 Biogás

Biogás é a mistura gasosa produzida pela conversão microbiológica anaeróbica de resíduos agroindustriais, tendo principalmente em sua composição o metano (CH_4), além do dióxido de carbono (CO_2) e gás sulfídrico (H_2S), cuja concentração varia de acordo com o resíduo tratado, com as técnicas de fermentação e pelas diferentes tecnologias de construção de usinas (LINS; FERNANDES, 2015).

Segundo Bley (2010), para fins energéticos, o biogás é composto basicamente de 55 a 59 % de metano, de 40 % de gás carbono e de 1 a 5 % de nitrogênio e outros gases, como o gás sulfídrico, o hidrogênio e o oxigênio.

Entretanto, segundo Schnürer e Jarvis (2009), a composição do biogás está diretamente relacionada ao tipo e à composição do substrato. Por este motivo, há variação na composição do biogás de diferentes tipos de biomassa. A Tabela 2 exemplifica a composição média do biogás para diferentes tipos de biomassa.

Tabela 2 - Composição média do biogás para alguns tipos de biomassa

Biomassa residual (efluente)	CH_4 [%]	CO_2 [%]	H_2S [ppm]
Amidonaria (mandioca)	54,3	44,9	97,0
Bovinocultura leiteira	59,6	39,1	329,3
Misto (aves de postura + bovinocultura de corte)	69,2	29,8	64,1
Abatedouro de aves	68,2	29,6	1.897,1
Suinocultura - terminação	62,0	37,0	2.782,3
Suinocultura - produção de leitões	68,4	30,6	1.309,1

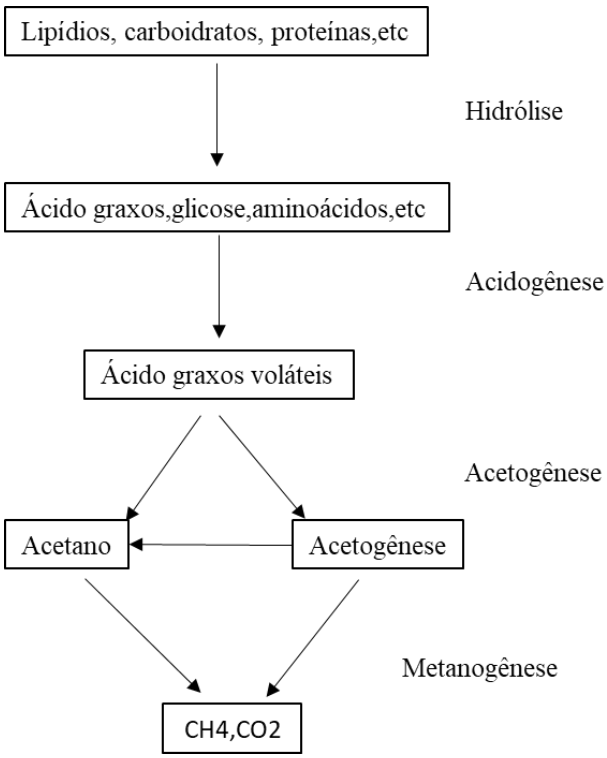
Fonte: Adaptado de LINS; FERNANDES (2015)

Não só a quantidade de biogás produzida em um sistema, mas sua composição também é importante, já que por meio dela é possível sugerir com segurança o destino que se dará a esse biogás e, se haverá necessidade de realizar algum tratamento específico antes de realizar seu aproveitamento, como por exemplo, a remoção de H_2S, para utilização do biogás em motores de combustão interna. (LINS; FERNANDES, 2015).

2.1.2 Etapas de produção do biogás

A quebra biológica de material orgânico, na ausência de oxigênio, conhecida como digestão anaeróbica, é o principal método de produção de biogás. A digestão anaeróbica pode ser dividida em 4 etapas: a) hidrólise; b) acidogênese; c) acetogênese; e d) metanogênese. A Figura 3 apresenta as etapas do processo de digestão anaeróbica.

Figura 3 – Etapas da digestão anaeróbica



Fonte: Adaptado de REIS (2012)

A hidrólise é o primeiro estágio, quando ocorre a conversão de materiais particulados em materiais dissolvidos mais simples, pela ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Essa fase é lenta e pode ser afetada por diversos fatores como: pH, temperatura, tempo de retenção hidráulica, tamanho e distribuição das partículas (CHERNICHARO, 1997).

No segundo estágio ocorre a acidogênese, que é caracterizada pela degradação de pequenas moléculas em ácidos graxos voláteis de cadeia curta (ex.: ácido acético, propiônico e butírico). A acidogênese ocorre no interior das células de bactérias fermentativas, em conjunto com a geração de subprodutos como NH_3, CO_2, H_2S. Diversos grupos de bactérias fermentativas efetuam a acidogênese, principalmente as espécies Clostridium e Bacteroides, particularmente Clostridium, são importantes devido à sua capacidade de sobrevivência em ambientes adversos (REIS, 2012).

Segundo Chernicharo (1997), na acetogênese, terceiro estágio do processo de biodigestão anaeróbica, as bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica, em substrato apropriado para as bactérias

metanogênicas. Dessa forma, as bactérias acetogênicas fazem parte de um grupo metabólico intermediário, que produz substrato para as metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são hidrogênio, dióxido de carbono e acetato. Durante a formação dos ácidos acético e propiônico, uma elevada quantidade de hidrogênio é formada, fazendo com que o valor do pH no meio aquoso decresça.

De todos os produtos metabolizados pelas bactérias acidogênicas, apenas o hidrogênio e o acetato pode ser utilizado diretamente pelas metanogênicas. Porém, pelo menos 50% da DQO biodegradável é convertida em propianato e butirato, os quais são posteriormente decompostos em acetato e hidrogênio pela ação das bactérias acetogênicas (CHERNICHARO, 1997).

A etapa final do processo global de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono é efetuada pelas bactérias metanogênicas. As bactérias metanogênicas utilizam apenas um limitado número de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio, dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono. Elas são divididas em dois grupos principais: o primeiro que forma metano a partir de ácido acético ou metanol, e o segundo que produz metano a partir do hidrogênio e dióxido de carbono (REIS, 2012).

Alguns fatores, como a temperatura e o pH, influenciam a atividade anaeróbica. Segundo Faria (2012), a temperatura é um fator importante na etapa de fermentação do biodigestor, pois influencia no processo de degradação biológica, afetando o volume do gás e do biofertilizante produzidos. Já a mudança no pH do meio, afetam as bactérias envolvidas no processo de digestão, podendo manifestar-se de formas diferentes, modificando suas estruturas e, consequentemente, perdendo suas características originais, aumentando ou diminuindo a toxicidade delas.

Além do biogás, o gás de síntese é um outro biocombustível que aparece como uma alternativa sustentável para a geração de bioenergia. As seções 2.2 a 2.2.5 discorrem sobre o gás de síntese, sua composição e o processo de obtenção do mesmo.

2.2 Gás de síntese

Gás de síntese é uma mistura de gases composta de hidrogênio (H_2) e de monóxido de carbono (CO), que pode ser produzida a partir de gás natural, de carvão, de petróleo, de biomassa e até mesmo a partir de resíduos orgânicos. O mesmo se apresenta como uma alternativa fonte crescente de combustíveis e de síntese de produtos químicos, sendo um combustível importante para a geração de eletricidade (WENDER, 1996).

O gás é obtido a partir do processo de gaseificação. O mesmo, quando realizado com ar, dá ao gás de síntese um teor considerável de nitrogênio (N_2), o qual deve ser removido quando se visa à produção de compostos químicos. Embora o gás de síntese seja conhecido como gás pobre, por seu baixo poder calorífico (5 MJ/Nm³ em média), ele é considerado passível de ser utilizado diretamente em Motor Alternativo de Combustão Interna (MACI), em Turbinas a Gás (TG) ou para a queima direta em fornos e em caldeiras. Em sua aplicação, são estabelecidos determinados requisitos de qualidade do gás, no que diz respeito ao seu poder calorífico, concentração dos componentes principais e de impurezas (LORA *et al*., 2012).

Segundo Kaltschmitt e Hartmann (2001), existem requisitos do gás de síntese para a sua utilização como combustível em diferentes acionadores primários. A Tabela 3 exemplifica os valores determinados.

Tabela 3 - Requisitos do gás de síntese para a sua utilização como combustível em diferentes acionadores primários.

Impurezas	Unidades	MACI	TG	Célula a combustível
Partículas	mg/Nm³	< 50	< 30	-
	μm	< 3	< 5	-
Alcatrão	mg/Nm³	< 100	-	< 1
Álcalis	mg/Nm³	-	<0,25	-
NH3	mg/Nm³	< 55	-	< 0,1
H2S	mg/Nm³	< 1150	-	< 1
HCI	ppm	-	-	< 1
SiO2	mg/Nm³	-	-	< 1

Fonte: Adaptado de SUÁREZ, (2014): Adaptada de (KALTSCHMITT e HARTMANN, 2001; NREL, 2001).

2.2.2 Tecnologias e processo de produção do gás de síntese

Dentre as tecnologias para obtenção do gás de síntese, destacam-se a pirólise e a gaseificação. A pirólise é um processo de degradação termoquímica que ocorre quando se aplica calor a uma substância ou material, em ausência total de oxidante. Neste sentido, a pirólise é um processo endotérmico que precisa de uma fonte externa de energia (calor) para seu desenvolvimento. Este processo permite a transformação da biomassa em três frações: sólida, gasosa e líquida (EES LORA *et al*., 2012).

A fração solida é composta em sua maioria de cinzas e carbono, dependendo da temperatura que foi empregada no processo. As cinzas e o carbono podem ser utilizados como combustível, ou na fabricação de carvão ativado, por meio da sua posterior ativação

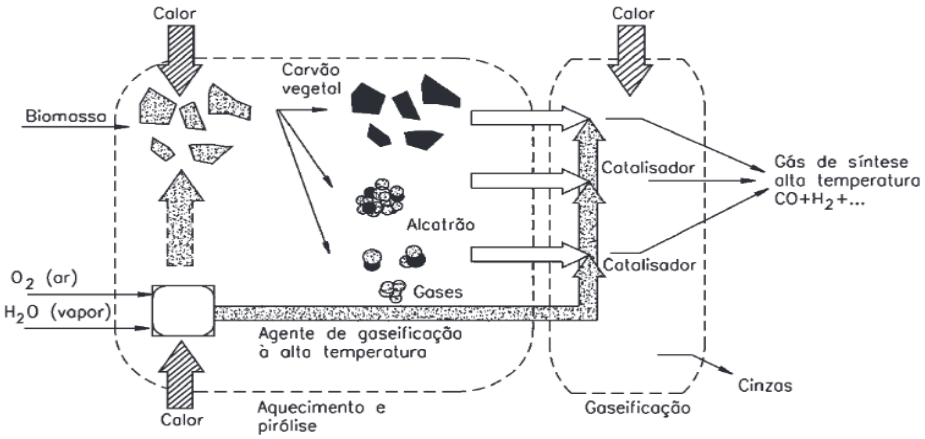
com CO_2 e/ou vapor de água. A fração gasosa é também combustível, sendo composta por H_2, CO, CO_2, CH_4, e outros hidrocarbonetos (CHIARAMONTI *et al*., 2007).

Segundo Méier e Faix (1999), a fração líquida também chamada de óleos pirolíticos, ou bio-óleo, é uma mistura complexa de componentes aromáticos e alifáticos oxigenados que também podem ser aproveitáveis em câmaras de combustão, em motor diesel, em turbinas, entre outros.

Por sua vez, a gaseificação é um processo termoquímico localizado em uma região paramétrica, entre a combustão e a pirólise. Este processo é entendido como o tratamento termoquímico que não permite a oxidação completa do carbono e do hidrogênio, presentes no combustível em CO_2 e H_2O, respectivamente, dando origem a compostos combustíveis, tais como CO, H_2 e CH_4. Além dos gases mencionados, também são produzidos: CO_2**,** H_2O**,** O_2 (em quantidades mínimas) e N_2 (quando o agente gaseificador é ar), assim como teores menores de hidrocarbonetos, tais como o eteno (C_2H_4), o etano (C_2H_6), entre outros (WARNECK, 2000).

As variáveis envolvidas em um processo de gaseificação são: fator ar, temperatura, capacidade de produção de gás, poder calorífico inferior (PCI) do gás produzido, composição do gás produzido e eficiência da gaseificação (JAYAH *et al*., 2003).

Figura 4 – Principais etapas da gaseificação da biomassa



Fonte: KNOEF (2002)

Segundo Wyman *et al*. (1992), o gás produzido num gaseificador, cujo agente de gaseificação é o ar, apresenta um (PCI) entre 3 e 6 MJ/Nm³, como consequência do efeito

de diluição pelo nitrogênio. O mesmo é conhecido como gás pobre, devido ao seu poder calorífico ser consideravelmente menor que o do gás natural (quase 10 vezes). Quando se utiliza O_2 puro como agente de gaseificação, ou uma mistura O_2 e vapor, é possível obter um gás com PCI na faixa de 10 e 19 MJ/Nm³. Os fatores que afetam o desempenho no sistema de gaseificação são (WYMAN *et al*., 1992):

- Utilização de catalisadores
- Razão de equivalência (fator ar)
- Tipo de agente de gaseificação
- Características da biomassa em termos físico-químicos e energéticos

2.2.3 Tipos de gaseificadores

Segundo Sanches (2010), um gaseificador precisa ter a capacidade de produzir um gás combustível limpo e de alta qualidade, a partir de diversos tipos de combustíveis. Um gaseificador precisa também ter um custo compatível e uma alta durabilidade para tornar-se viável.

Os gaseificadores podem ser classificados de diversas maneiras, embora a classificação tradicional seja de dois tipos: gaseificadores de leito fixo e os de leito fluidizado (NOGUEIRA e LORA, 2003).

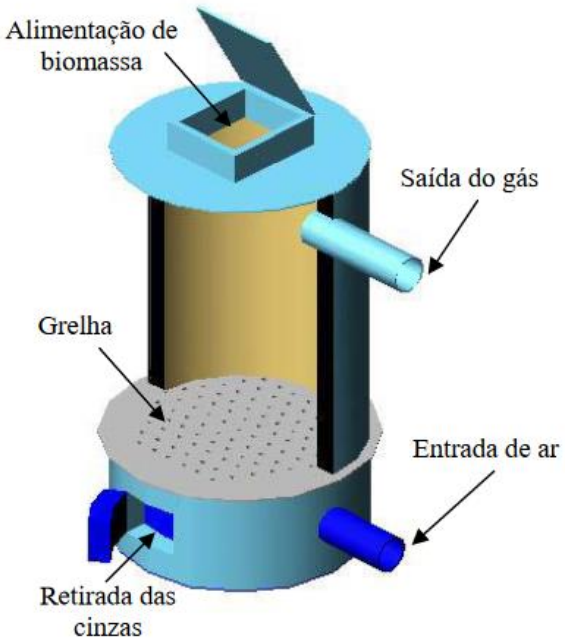
Segundo Lora (2012), os gaseificadores podem ser classificados de acordo com as seguintes características:

- Direção do fluxo da biomassa
- Agente de gaseificação
- Forma como o reator recebe calor

O gaseificador de leito fixo é o tipo de gaseificador mais antigo e mais utilizado. Possui uma tecnologia relativamente simples, comparada aos gaseificadores de leito fluidizado. Ele pode ser do tipo contracorrente (“*up draft*”) ou concorrente (“*downdraft*”).

Nos gaseificadores do tipo leito fixo contracorrente, o fluxo de gás é contrário à alimentação da biomassa, que é feita pela parte superior do equipamento. Possui alta eficiência térmica, porém, produz um gás impuro, pois o alcatrão produzido não é craqueado na zona de combustão, sendo arrastado pelo gás produzido (ANDRADE, 2007).

Figura 5 – Esquema de um gaseificador contracorrente

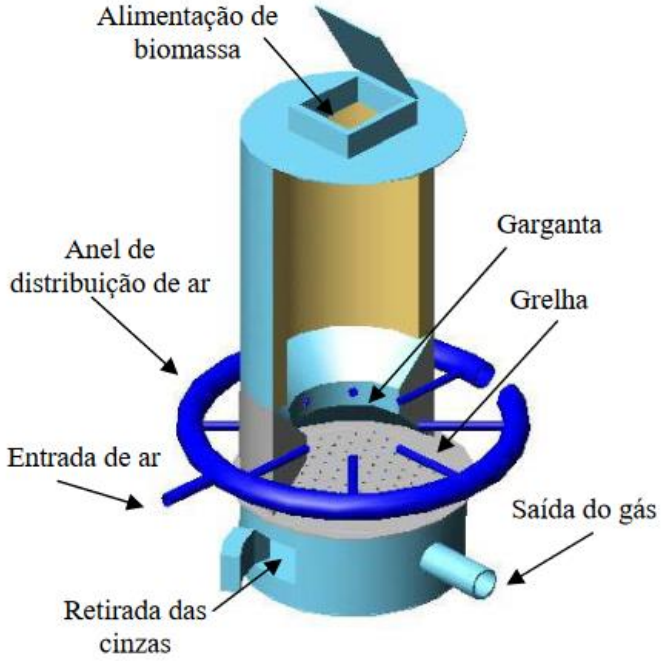


Fonte: SANCHES (2010)

A utilização do gás produzido nesse tipo de gaseificador em motores de combustão interna é desaconselhada, devido à produção de um gás com alta concentração de alcatrão.

O gaseificador leito fixo concorrente, é o tipo mais difundido e amplamente utilizado. O gás produzido nesse tipo de gaseificador é mais puro, contendo menos alcatrão, quando comparado ao contracorrente. Em seu processo de gaseificação, a biomassa é alimentada pela parte superior do reator e o ar é fornecido, também, por cima ou lateralmente. O gás gerado é direcionado para a parte inferior do equipamento podendo, o gás produzido, passar por regiões de alta temperatura, possibilitando o craqueamento do alcatrão que é arrastado (SANCHES, 2010).

Figura 6 – Esquema de um gaseificador concorrente



Fonte: Sanches (2010)

Nesse contexto, existem também os gaseificadores de leito fluidizado, que podem ser de dois tipos: leito fluidizado borbulhante e circulante. No gaseificador de leito fluidizado borbulhante, o gás obtido possui menor quantidade de alcatrão devido ao seu maior tempo de residência, mas com um elevado conteúdo de metano. Os de tipo leito fluidizado circulante, aceitam uma maior variedade de matérias-primas e cargas mais reativas, sendo esse processo realizado a baixas temperaturas (BOLOY *et al*., 2017).

Dentre as vantagens apresentadas por esse tipo de gaseificador, pode-se destacar a tolerância na variação da qualidade do combustível, bom controle da temperatura no leito e uma alta eficiência de conversão (ANDERSON *et al*., 2020).

Nesse contexto, tendo conhecimento dos biocombustíveis a serem estudados e das respectivas tecnologias para sua produção, é importante destacar o uso da biomassa no processo de obtenção desses combustíveis. O capítulo 3 a seguir disserta sobre o uso da mandioca como biomassa na produção dos biocombustíveis.

3. Utilização da Biomassa na produção de Biocombustível

Biomassa (massa biológica) é a quantidade de matéria orgânica produzida em uma determinada área de um terreno. Ela é capaz de gerar gases que são transformados, em usinas específicas, em energia. A biomassa é uma alternativa sustentável, pois é renovável e gera menos quantidades de poluentes quando comparada com outras fontes (CORTEZ *et al*., 2008).

Além das plantas, derivados de animais também são biomassas. A utilização dessa biomassa como combustível pode ser feita na sua forma bruta ou através de seus derivados. Madeira, produtos e resíduos agrícolas, resíduos florestais, excrementos animais, carvão vegetal, álcool, óleos animais, óleos vegetais, gás pobre, biogás são formas de biomassa utilizadas como combustível (F PACHECO, 2006).

Desta forma, a Mandioca se apresenta como uma alternativa no uso de biomassa para produção de bioenergia no Brasil, já que além da importância da energia limpa para o planeta, os resíduos produzidos quando não bem aproveitados, são prejudiciais ao meio ambiente. Segundo Munasinghe *et al*.(2012), os resíduos a base de mandioca produzidos na indústria tem potencial para gerar diversos produtos de alto valor adotando um conceito de biorefinaria e produção de bioenergia.

3.1 Mandioca

Mandioca, macaxeira, aipim, castelinha, uaipi, mandioca-doce, mandioca-mansa, maniva, maniveira, pão-de-pobre, mandioca-brava e mandioca-amarga, são termos brasileiros para designar a espécie *Manihot esculenta*. É uma espécie de planta tuberosa da família das *Euphorbiaceae* (CARDOSO, 2004).

É a terceira maior fonte de carboidratos nos trópicos, depois de arroz e milho, e um dos principais alimentos básicos no mundo em desenvolvimento, existindo na dieta

básica de mais de meio bilhão de pessoas. Espalhada para diversas partes do mundo, tem a Nigéria como seu maior produtor (FAO, 2020).

Segundo Cereda (2001), devido à significativa função social que possui, principalmente em relação às famílias de menor poder aquisitivo, contribuindo para alimentação de aproximadamente meio bilhão de pessoas em todo o planeta, a cultura da mandioca é explorada em mais de 90 países. A Tabela 4 a seguir sintetiza os principais valores da produção brasileira de mandioca por região.

Tabela 4: Produção brasileira de mandioca por região.

Região	Área colhida (ha)	Quantidade produzida (t)	Rendimento médio (t/ha)	Participação na produção (%)
Norte	473.872	7.212.771	15,22	38,21
Nordeste	454.157	3.881.931	8,55	20,56
Sudeste	101.018	1.830.266	18,12	9,7
Sul	220.575	4.765.265	21,6	25,24
Centro-Oeste	65.229	1.186.237	18,19	6,28
BRASIL	1.314.851	18.876.470	82	100

Fonte: Autoria própria com base nos dados do IBGE (2019)

Por meio da Tabela 4 foi possível observar que a região Norte, escolhida para ser estudo de caso do presente trabalho, é a que possui maior produção no Brasil, chegando a produzir 7.212.771 toneladas de mandioca no ano.

A utilização para benefício industrial da mandioca gera, porém, uma série de resíduos cujo impacto no meio ambiente pode ser prejudicial. Os principais resíduos gerados são: resíduos sólidos, como casca marrom, entrecasca, descarte, crueira, fibra, bagaço e varredura; e resíduos líquidos como água de lavagem; manipueira (água vegetal ou água de prensa) e água de extração de fécula (DEL BIANCHI, 2008).

3.1.2 Produção de biocombustíveis e geração de bioenergia a partir do aproveitamento dos resíduos da mandioca

Em sua composição bioquímica, a mandioca possui um elevado conteúdo orgânico (rico em carboidratos) favorecendo a conversão bioquímica de seus resíduos em bioenergia (QI ZHOU *et al*., 2015).

Segundo Zhang *et al.* (2016), o processamento da matéria - prima fresca produz em torno de 8,85 a 10,62 toneladas de resíduos líquidos por tonelada de mandioca processada, contendo cerca de 1% de sólidos totais. De 0,93 a 1,12 toneladas do bagaço de mandioca úmida e cascas são produzidas por tonelada de mandioca seca processada.

Esses resíduos podem ser resíduos sólidos, fibrosos e amido preto. O amido preto é um subproduto composto por amido e substâncias orgânicas não solúveis, que não podem ser decompostas em açúcares simples, no tratamento de hidrólise ácida ou de hidrólise enzimática. O bagaço da mandioca, que é um resíduo sólido típico, contém entre 40,1 e 75,1% de amido (peso seco) e 14,9 e 50,6% de fibra, principalmente celulose e polissacarídeos não amiláceos. Já as águas residuais de amido, é um líquido ácido rico em carboidrato total (9,6 e 37,5 g/L) e nutrientes como nitrogênio e fósforo que pode chegar a 1300 e 780 mg/L, respectivamente (ZHANG *et al*., 2016).

Na produção de farinha-seca a partir da mandioca, durante a etapa de prensagem, uma água residual de elevado teor orgânico é produzida, chamada de manipueira, sendo composta de um suco celular com água de lavagem das raízes da mandioca. Devido à presença do ácido cianídrico na composição da manipueira e, ao efeito tóxico desta substância, a poluição gerada por este efluente é considerada elevada, sendo necessário um tratamento diferenciado deste resíduo em relação aos demais resíduos gerados pela agroindústria antes de ser lançado no meio ambiente (CHAVES; BOLOY; SOARES, 2017).

Os resíduos sólidos da mandioca diferem em sua composição, possivelmente por se originarem de diferentes partes da planta, sendo necessário um maior controle do processamento dos resíduos gerados. O armazenamento dos resíduos é feito em um campo aberto, o que acelera sua degradação causando problemas ambientais, como contaminação dos lençóis de água e liberação de fortes odores (ZHANG *et al*., 2016).

3.2 Produção de biogás a partir da manipueira

A manipueira, um líquido composto da água adquirida pela indústria, juntamente com o líquido da raiz da mandioca, é obtida na etapa de prensagem, onde se retira a água contida nas raízes, com o objetivo de economizar combustível na etapa de secagem. A forma mais comum de descarte desse resíduo é seu depósito nos corpos d'água e no próprio ambiente circundante, provocando condições de insalubridade na população, afetando a saúde, e a economia dessa atividade (SANTOS, 2009; PINHO, 2007).

A composição da manipueira pode variar de acordo com o meio de cultivo, o clima, a temperatura, a umidade do ar, o tipo de solo, a precipitação e com o tipo de processamento adotado. De forma geral, a composição química da manipueira pode ser descrita segundo a Tabela 5 a seguir:

Tabela 5: Composição Química da Manipueira.

Componentes	Manipueira
Nitrogênio	3,42
Fósforo	0,70
Potássio	3,09
Cálcio	0,19
Magnésio	0,60
Sódio	0,46
Cianeto Livre	0,0425
DBO	14-34
pH	4-5

Fonte: CHAVES; BOLOY; SOARES (2017)

Visto que esse resíduo é prejudicial ao meio ambiente, por possuir elevada carga orgânica, alta concentração de ácido cianídrico e elevado teor de potássio, magnésio entre outros, se faz necessário seu correto descarte e aproveitamento (KUCZMAN *et al*., 2011).

Um potencial uso para a manipueira é seu aproveitamento na produção de biogás por digestão anaeróbica, onde o resíduo líquido é convertido em metano e, a matéria orgânica a um composto estável com possibilidade de uso como adubo, melhorando as condições ambientais e de salubridade geradas nas regiões vizinhas e aos estabelecimentos de produção (BARANA, 2000).

Dessa forma, o reaproveitamento da manipueira é importante não apenas para questões ambientais, mas também para melhorar as condições de dependência energética de pequenos produtores rurais, a partir da geração de energia.

Kuczman *et al*. (2011) verificavam em seu estudo que, devido à possibilidade de acidificação do reator no processo de biodigestão de efluente de fecularia (manipueira), é necessário um sistema com separação de fases para o tratamento anaeróbico da manipueira.

O estudo apresentado por Barana (2000), avaliava o tratamento de manipueira em biodigestores de fase acidogênica e de metanogênica. O reator acidogênico utilizado foi do tipo fluxo ascendente e o metanogênico de filtro anaeróbio com fluxo ascendente. Verificou-se eficiência nesses 2 tipos de biodigestores, principalmente durante as etapas em que houve correção de pH da manipueira do reator metanogênico.

3.3 Produção de gás de síntese a partir do bagaço da mandioca

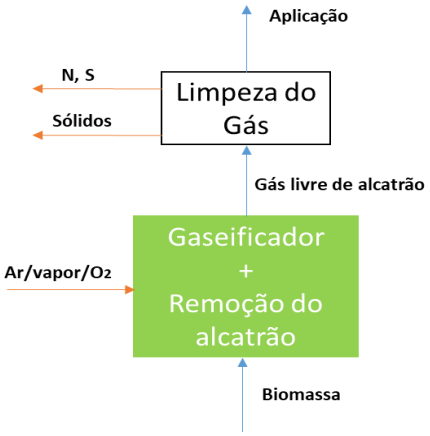
A utilização da biomassa de resíduos agrícolas como matéria-prima na gaseificação é vantajosa, pois em seu processo, a quantidade de CO_2 gerada é equivalente à absorvida pelos vegetais de origem, em um ciclo fechado de carbono. Porém, segundo Wang *et al.* (2008), ainda se faz necessário a melhoria da tecnologia de gaseificação, principalmente para se obter uma melhor eficiência do processo de redução dos resíduos finais gerados, como o alcatrão.

O alcatrão é um dos maiores problemas na eficiência dos processos de gaseificação da biomassa, pois quando produzido, pode condensar-se e causar corrosão nos equipamentos e tubulações. Uma elevada quantidade do alcatrão pode não só prejudicar o processo catalítico, mas também, reduz a eficiência do processo global (ARDILA, 2017).

Segundo Diaz., *et al.* (2004), os métodos existentes para a remoção do alcatrão podem ser classificados em dois tipos: métodos primários, se o alcatrão é removido no próprio gaseificador e, métodos secundários, se o alcatrão é removido depois da

gaseificação. A seguir, as Figuras 7 e 8 demonstram os processos primário e secundário de remoção do alcatrão.

Figura 7: Remoção do alcatrão pelo método primário.



Fonte: Adaptado de ARDILA (2017).

Figura 8: Remoção do alcatrão pelo método secundário.



Fonte: Adaptado de ARDILA (2017).

Um estudo apresentado por Lora *et al.* (2012), demonstra que as principais diferenças entre os gaseificadores existentes para produção de gás de síntese, a partir de biomassa lignocelulósica, são:

- Teor de componentes menores no gás de síntese
- Teor de componentes maiores (H_2, CO, etc)
- Necessidade de separação do ar para a produção de oxigênio

Verificou-se também que, gaseificadores com aquecimento direto com ar como agente de gaseificação não são adequados para geração de gás de síntese, devido à alta concentração de nitrogênio no gás. Constatou-se também que gaseificadores de leito fixo não são qualificados para geração de gás em grande escala industrial devido a sua capacidade limitada (<5MWt). Gaseificador alotérmico de aquecimento indireto, tem vantagem por apresentar alto teor de hidrogênio no gás produzido, porém, apresenta uma maior quantidade de alcatrão (LORA *et al*., 2012).

Nesse contexto, é importante ressaltar a importância da utilização de tecnologias para conversão desses combustíveis gasosos em energia elétrica. Dentre as tecnologias existentes para conversão de combustíveis gasosos em eletricidade estão os motores. Os motores de combustão interna são muito utilizados por poderem operar com diferentes tipos de combustíveis, tanto líquidos como gasosos. Mais especificamente, os motores de combustão interna são equipamentos que possuem a capacidade de transformar a energia química do combustível em trabalho mecânico e são utilizados em larga escala para geração de eletricidade contínua (SUZUKI *et al*., 2011).

O capítulo 4 a seguir discorre sobre os motores de combustão interna e a aplicação do biogás e do gás de síntese como combustíveis gasosos.

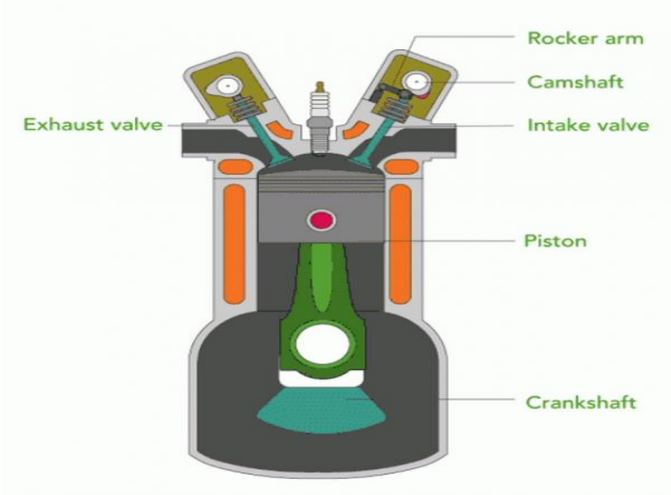
4. Motores de Combustão Interna

Motor de combustão interna, também conhecido como motor a explosão, é uma máquina térmica capaz de transformar energia proveniente de uma reação química em energia mecânica através de ciclos termodinâmicos. Eles são capazes de converter qualquer forma de energia (como térmica, hidráulica, elétrica ou química) em energia mecânica. Nesse tipo de motor, o combustível é queimado internamente (SUZUKI *et al*., 2011).

Segundo Qian *et al.* (2017), a maioria dos biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, por exemplo, tem propriedades físico-químicas adequadas para uma combustão eficiente em motores de combustão interna, sem ou com apenas pequenas modificações. Segundo Quian, a maioria dos biocombustíveis contém uma proporção de oxigênio molecular suficiente para ajudar a combustão do combustível.

Os motores podem ser distinguidos pelo ciclo Otto e ciclo diesel, apresentando seus ciclos termodinâmicas como principal diferença de funcionamento. Enquanto no ciclo Otto a combustão começa por uma vela em alta velocidade, em volume quase constante e uma considerável elevação de pressão, os motores de ciclo diesel possuem uma combustão iniciada de forma espontânea com o aumento da temperatura em paralelo ao processo de compressão adiabática no interior do cilindro, seguido da adição de combustível a velocidade controlada e alta pressão (VARELLA, 2012). Quanto ao rendimento, os das máquinas Otto são um pouco inferior ao das máquinas diesel. Os motores com ciclo Otto possuem um rendimento situado entre 22% a 30%, e os diesel, entre 30% e 38% (BRUNETTI, 2009). A Figura 9 apresenta a ilustração dos processos de um motor de combustão interna.

Figura 9: Motor de combustão Interna.



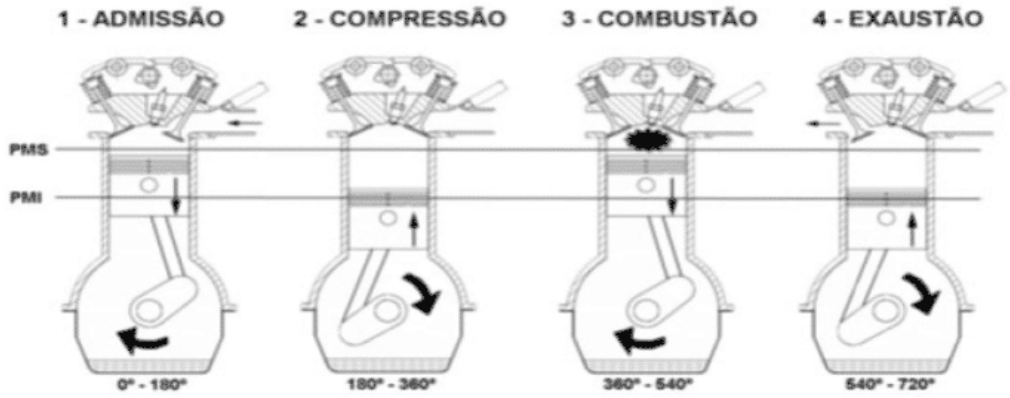
Fonte: BRUNETTI (2009)

Nos motores de ciclo Otto são usados com sucesso dois tipos de sistemas de dosagem de combustível: Os carburadores e os sistemas de injeção eletrônica. Os carburadores são baseados na sucção de combustível, já os de injeção eletrônica são baseados na injeção de combustível (BRUNETTI, 2009).

Os motores Otto operam com três parâmetros para gerar torque de combustão: a massa de ar, a massa de combustível e a centelha elétrica da vela de ignição.

Quanto aos ciclos, os motores operam em quatro ciclos de diferentes etapas que ocorrem pelo deslocamento do pistão. A figura 10 ilustra as etapas de um motor de quatro tempos (BRUNETTI, 2015).

Figura 10: Etapas ciclo otto



Fonte: BRUNETTI (2009)

As etapas do motor ciclo Otto, composta de 4 partes, começada pela admissão. Nessa etapa, a válvula de exaustão retorno a sua posição inicial por meio da força de retorno da mola e a válvula de admissão é deslocada de seu ponto inicial pelo comando de válvulas, permitindo que a mistura carburante seja aspirada para o cilindro. Na etapa de compressão, por meio da força de retorno da mola da válvula, a válvula de admissão retorna a sua posição inicial, vedando a câmara de combustão. Desta forma, a mistura carburante é comprimida com o objetivo de aumentar a pressão dentro do cilindro. Na terceira etapa, ocorre a combustão, onde a vela de ignição produz uma centelha elétrica que reage com a mistura carburante já previamente comprimida, ocorrendo um aumento da pressão dentro da câmara de combustão. Na última etapa, ocorre a exaustão. Nessa etapa a válvula de exaustão é deslocada de seu alojamento inicial, permitindo que os gases sejam expelidos da câmara de combustão (VALLE *et al*., 2015).

4.1 Aplicação de biogás em motores de combustão interna

O biogás é um tipo de combustível com baixo valor de cetano. Em geral, os componentes do biogás podem ser divididos em duas categorias: componentes combustíveis e componentes não combustíveis. Os componentes combustíveis são principalmente CH_4, CO e H2. Os componentes não combustíveis são principalmente CO_2 e N_2 (QIAN *et al.*, 2017).

Quanto ao desempenho do biogás no MCI, em um motor / gerador, assumindo que a eficiência do motor é de 30% e a eficiência do gerador de cerca de 70%, a taxa de produção de gás necessária para produzir 1 kW de eletricidade é de 0,56 m^3 / h (HUANG e CROOKES, 1998).

Para a operação dos motores de combustão interna com biogás, algumas alterações e adaptações devem ser realizadas. Para o ciclo Otto, a modificação fundamental é a adaptação de um dispositivo ar-biogás, em substituição ao carburador ou, um sistema de injeção eletrônica, que apresenta como principal finalidade o abastecimento do motor com biogás com a pressão e volume apropriados. Esse tipo de motor, movido a biogás, requer o mesmo com um mínimo de 45% de metano (VALLE *et al*., 2015). Outra

restrição para a utilização do biogás como combustível, em motores de combustão interna é, a necessidade da remoção do gás carbônico e o gás sulfídrico (COELHO, 2006). A purificação do biogás é importante porque por ser corrosivo, o gás sulfídrico deteriora motores e, por outro lado, a remoção do gás carbônico aumenta o poder calorífico, uma vez que mantém armazenada maior densidade de biogás, concomitantemente, a diminuição da presença de gás abafante presente (OLIVEIRA, 2009). Diversas técnicas de purificação do biogás são empregadas principalmente para a remoção de H_2S, a partir de processos químicos, Fe/EDTA (FRARE, 2009).

Para o presente estudo, o motor escolhido já possui as modificações necessárias para sua utilização com o biogás.

4.2 Aplicação de syngas em motores de combustão interna

Perez *et al.* (2015) elaboraram um estudo de um sistema de cogeração com MCI queimando gás de síntese de biomassa (syngas). O estudo não só apresentou viabilidade técnica, como econômica também.

A geração de eletricidade em pequena escala pode ser realizada utilizando o gás de síntese diretamente em um motor de combustão interna ou em uma microturbina a gás ou uma célula combustível, sem a necessidade de um ciclo de vapor (LORA *et al*., 2004).

Segundo Chaves (2012), para o uso do syngas em motores a gasolina, não são necessárias muitas modificações neles, podendo funcionar apenas com o gás. A razão de mistura gás-ar geralmente utilizada é de 1:1, podendo ser introduzida direto no carburador.

Já em motores a diesel, não é possível sua operação utilizando apenas gás de síntese. O gás pode substituir o diesel em até 90 %, devendo-se realizar a partida com diesel e introduzir o syngas gradativamente (MARTINS, 2006).

Embora o syngas utilizado juntamente com o diesel possa reduzir custos e emissões de NOx e de material particulado, seu desempenho no rendimento é mais baixo quando comparado ao gás natural veicular (GNV) e o diesel. Também, o desempenho do

gás de síntese no MCI depende de sua qualidade, que depende principalmente do agente gaseificador usado no processo (YOHANNES; RASHID; SHARARIN, 2015).

4.3 Aplicação da mistura biogás-gás de síntese em motores de combustão interna

O desempenho da aplicação do biogás em motores de combustão interna é afetado quanto o mesmo é misturado com outros gases, sobretudo, quando se trata do syngas, que é um gás com uma alta concentração de hidrogênio em sua composição.

Em seu estudo, Bouguessa *et al*. (2020) estudavam a valorização do biogás como combustível em motores de combustão interna. Em sua investigação, o biogás adicionado de 10 %, 15 % e 20 % de hidrogênio ficou mais enriquecido, aumentando o desempenho na combustão. A adição de 20 % de H_2 reduziu o teor de metano nas emissões de escape, aumentando dessa forma o desempenho no motor.

Qian *et al.* (2017) também complementaram em seu estudo a melhora da combustão de um biogás operando em um motor de combustão interna a partir da adição de uma determinada proporção de H_2.

Montoya *et al*. (2012) salientam que a adição de hidrogênio ao biogás melhora a estabilidade da combustão e, produz aumentos nos picos de pressão, eficiência térmica e diminuição no retardo de ignição e emissões de CO e CO_2. O efeito do biogás, enriquecido com hidrogênio, tem uma influência maior na pressão do cilindro em plena carga; este aumento é de cerca de 17%, devido ao biogás enriquecido com hidrogênio de 0 a 20% em volume, em comparação com um aumento do nível de pressão de cerca de 12%, quando a carga é de 40%.

Ademais, segundo Montoya, o biogás enriquecido com hidrogênio (20% em plena carga) afeta positivamente as emissões de CO e CO_2, diminuindo-as em até 30%.

É importante destacar que, segundo Salman *et al.* (2020), em relação às emissões, o biogás enriquecido por percentagens de H_2 (5-20% em vol.) apresentou emissões de CO_2 menores em comparação com a operação com biogás-diesel em todas as cargas do motor. Reduções significativas nas emissões de CO_2 de até 56% foram observadas com

20% de H_2 no biogás. No entanto, a adição de hidrogênio ao biogás aumentou as emissões de NOx, CO e hidrocarbonetos. As emissões de NO_x aumentaram quando a porcentagem de H_2 foi aumentada no biogás. A Tabela 6 a seguir sintetiza os estudos citados anteriormente e seus principais resultados quanto a aplicação dos 2 gases no motor de combustão interna.

Tabela 6: Aplicação de biogás enriquecido com hidrogênio em MCI

	Categoria de avaliação					
Autores	Objetivo do estudo avaliado	Aumento no desempenho da combustão do motor	Redução nas emissões de CO	Redução nas emissões de CO_2	Biogás	H_2
Bouguessa *et al* (2020)	Avaliar através de um estudo experimental o desempenho do biogás adicionado de H_2 no MCI	x			x	x
Qian *et al* (2017)	Revisão sistemática da aplicação de biogás em MCI	x			x	x
Montoya *et al* (2012)	Avaliar a performance do biogás enriquecido de hidrogênio em motores dual		x	x	x	x

Luo G; Irini (2012)	Avaliar a melhoria do biogás adicionado de hidrogênio em um reator anaeróbio	x			x	x
Salman *et al* (2020)	Avaliar os efeitos do biogás adicionado de H_2 nas emissões de um MCI		x	x	x	x

Fonte: autoria própria

Por meio da Tabela 16 foi possível verificar a importância da mistura do biogás com o hidrogênio, aplicados no MCI, onde o impacto é positivo não só na eficiência do motor, mas também afetava positivamente o meio ambiente, já que reduz a emissão de CO_2 e CO, gases prejudiciais ao meio ambiente e a saúde.

Tendo conhecimento da importância da mandioca como biomassa na obtenção do biogás e do gás de síntese, das tecnologias para obtenção e conversão desses gases em energia elétrica e, do uso da mistura biogás-gás de síntese em motores de combustão interna, foi realizado um panorama sobre o uso dos resíduos da mandioca como biomassa para a produção de biocombustíveis. O capítulo 5 a seguir disserta sobre o panorama realizado e os resultados encontrados a partir dele.

5. Uso de resíduos da mandioca como biomassa

5.1 Panorama nacional e internacional

Para analisar a evolução das pesquisas realizadas no cenário acadêmico nacional e internacional nos últimos 10 anos, sobre o desenvolvimento da tecnologia de produção de bioenergia através da mandioca como biomassa, bem como mostrar os avanços dos estudos nesse período e os principais resíduos da mandioca utilizados e os biocombustíveis produzidos, realizou-se um panorama associado as publicações encontradas na literatura, fazendo uso da base de dados do Scielo e da Web of Science. Os artigos foram selecionados utilizando o termo chave "mandioca" e "biomassa" e "*cassava AND biomass*" separadamente no título ou no resumo; em uma segunda busca foi usado o termo "mandioca e bioenergia" e "*cassava AND bioenergy*" no resumo. Para a base da Web of Science, foi selecionada a categoria *Energy fuels,* após os 2 refinamentos de termo chave na busca. O período escolhido para busca foi de 2010 a 2019. O critério de seleção para escolher o corpus documental que compôs o acervo a ser examinado por essa pesquisa, foi o foco do estudo dos resíduos da mandioca como biomassa para geração de bioenergia.

Essa análise permitiu mostrar as tendências quanto ao uso de resíduos da mandioca como biomassa, bem como a evolução das pesquisas no cenário acadêmico envolvendo o tema nos últimos 10 anos. Os indicadores trazem um mapeamento do cenário, mostrando os principais países envolvidos, bem como os resíduos da mandioca e os biocombustíveis mais estudados.

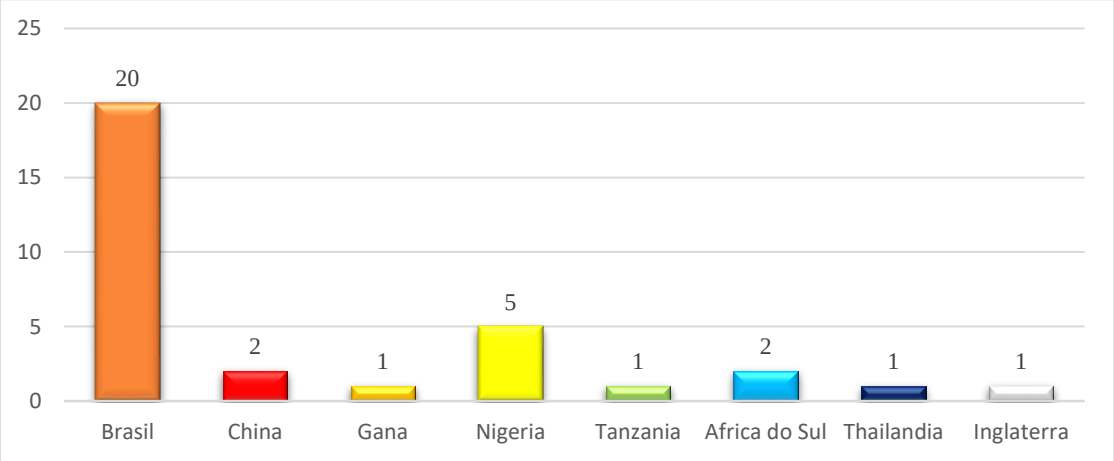
Em relação à pesquisa realizada, limitada a base de dados do Scielo e do Web of Science, foram encontrados um total de 91 artigos dos quais 33 tinham relação direta com o tema proposto. A Figura 14 mostra a quantidade de artigos por país, no período de 2010 a 2019, completando um total de 10 anos. De acordo com a Figura 14, verifica-se uma diferença entre o número de artigos nacionais e internacionais. Pode-se constatar que 60 % dos artigos são brasileiros e os outros 40 % se dividem entre a China, a Inglaterra e cinco países africanos. China e Inglaterra aparecem como únicos representantes de seus

respectivos continentes. Essa diferença na quantidade de artigos publicados entre o Brasil e os demais países é reflexo da posição atual em que o país se encontra, quando o assunto é biocombustível. Segundo o Programa FAPESP de Pesquisa em Bioenergia (BIOEN), o Brasil é o segundo maior produtor de biocombustíveis no mundo, atrás apenas dos Estados Unidos. Esse destaque do país vem das consequências dos investimentos em pesquisas, como o BIOEN (BRASILAGRO, 2021).

Ademais, através do Congresso Nacional, foi escolhida a Política Nacional de Biocombustíveis, o RenovaBio, instituído pela Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, como parte integrante da política energética nacional. O RenovaBIO visa contribuir para o atendimento aos compromissos do País no âmbito do Acordo de Paris e para promover a adequada expansão da produção e do uso dos biocombustíveis na matriz energética nacional, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis (MME, 2020).

A BIOEN e o RenovaBIO são programas que reforçam o empenho do Brasil no investimento e no estudo dos biocombustíveis, o que se reflete na grande diferença de artigos publicados, conforme demonstrado na figura 11.

Figura 11: Quantidade de artigos publicados por país no período de 2010 a 2019

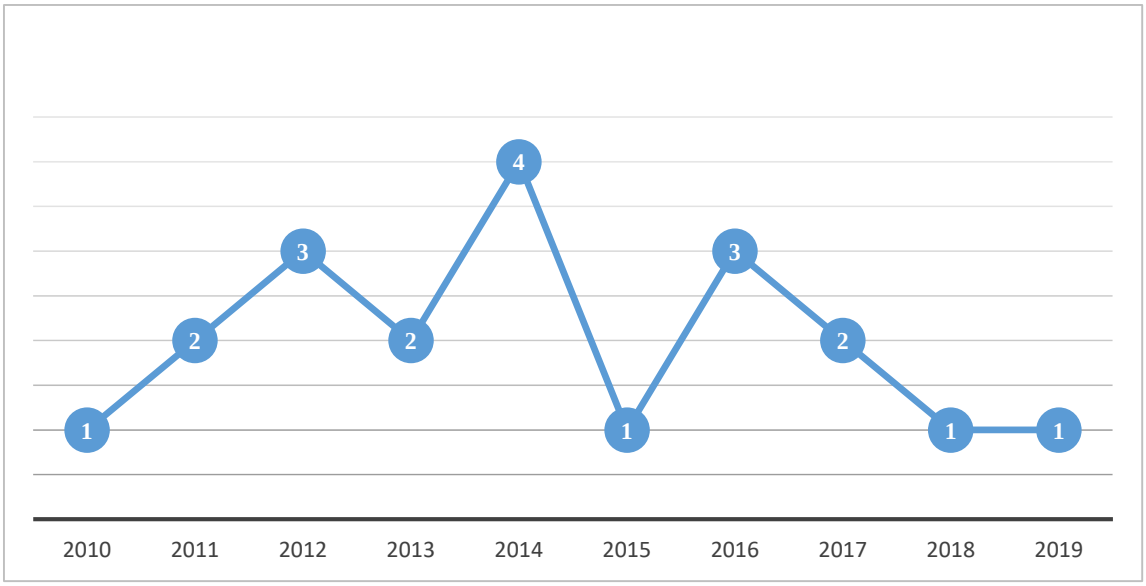


Fonte: Autoria própria

A partir dos dados obtidos, foi possível fazer um mapeamento da evolução da produção de artigos nacionais por ano. A Figura 12 mostra que, no período de 2010 a 2019, os maiores índices de produção foram em 2012, 2014 e 2016 e, logo em seguida, apresenta uma baixa relevante na produção acadêmica referente ao tema pesquisado.

A crescente na produção no período entre 2010 e 2014, não se repete nos últimos 3 anos, o que fica mais evidente com os índices mais baixos em 2018 e 2019.

Figura 12: Evolução da produção de artigos no período de 2010 a 2019



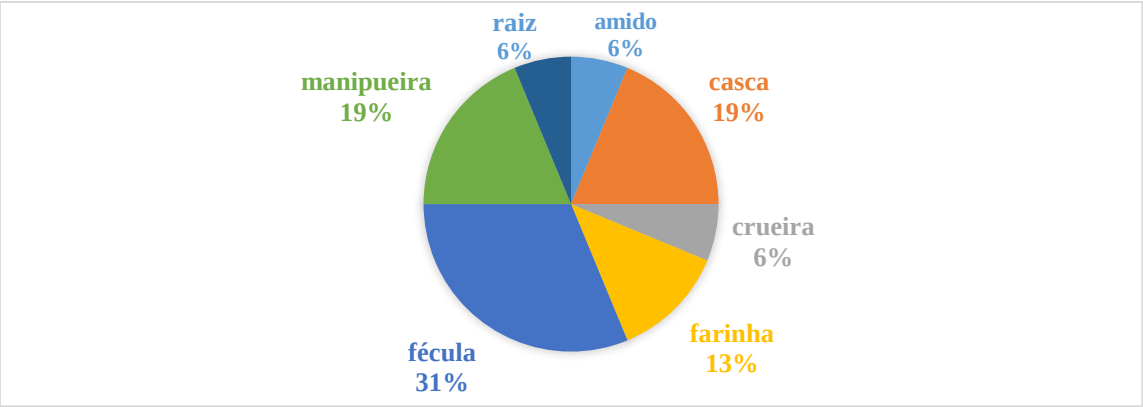
Fonte: Autoria própria

Dentre as fontes de biomassa mais utilizadas no Brasil, em primeiro esta o bagaço da cana-de-açucar, que sozinho representa 78% do total (AUTOSSUSTENTAVEL, 2017). O maior foco no uso do bagaço da cana como biomassa reflete diretamente nos estudos acadêmicos referentes a produção de biocombustíveis, o que explica a oscilação no gráfico da figura 12, onde é possível verificar uma falta de constância nas publicações referentes ao uso de resíduos da mandioca como biomassa.

Por meio da Figura 13 verificam-se os principais resíduos da mandioca que foram estudados nos últimos 10 anos, como é o caso da fécula, manipueira, casca, farinha, crueira, amido e raiz. Verificou-se um foco maior no estudo da fécula e da manipueira como biomassa, o que representa cerca de 50% do total de publicações. Se for considerado que a farinha de mandioca e a fécula são a mesma coisa, porém recebem nomes diferentes dependendo da região, esse percentual subiria para 63%. A casca foi o terceiro resíduo mais estudado, representando 19% do total de artigos publicados.

Constatou-se que o bagaço, resíduo fibroso da raiz da mandioca, não apareceu em nenhum dos artigos pesquisados.

Figura 13: Resíduos da mandioca mais estudados no período de 2010 a 2019

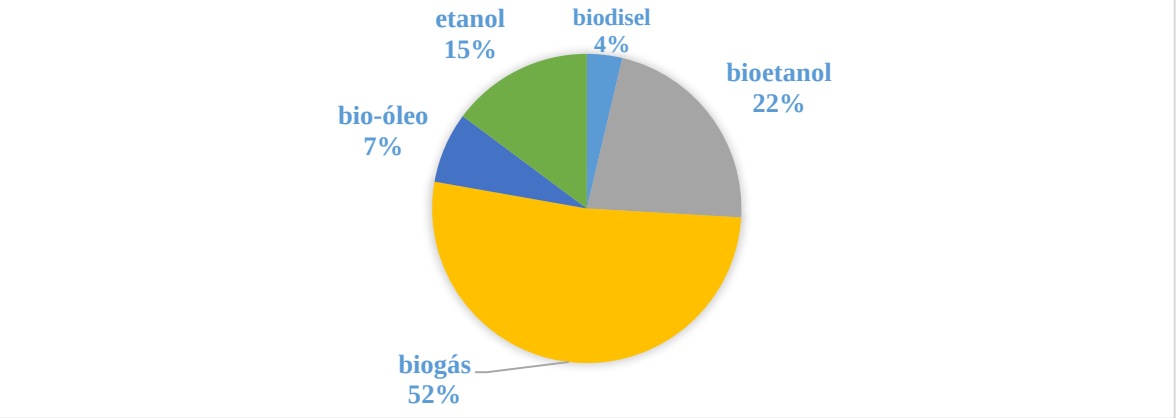


Fonte: Autoria própria

Segundo Martinez e Feiden (2017), o farelo e a fécula são os principais descartes sólidos produzidos nas fecularias e, em geral, são jogados nos cursos d'água ou deixados em valas que extravasam e carregam grande carga orgânica para os mesmos. O segundo maior resíduo produzido nas fecularias é a manipueira, que quando não descartado da forma correta, é prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente. A figura 16 reflete o foco no estudo dos maiores resíduos gerados nas fecularias, para produção de biocombustíveis, buscando uma alternativa sustentável para o seu descarte.

A Figura 14 mostra os biocombustíveis obtidos a partir do uso de resíduos da mandioca como biomassa. Verificou-se que o biogás é o biocombustível mais encontrado quando se trata do uso de resíduos da mandioca como biomassa. Com 52% do total, o biogás vem em primeiro lugar, seguido do bioetanol (22%) e etanol 15%. Considerando que bioetanol e o etanol são o mesmo composto, são obtidos através de processos químicos e bioquímicos diferentes que originam um mesmo produto, podendo ser conhecido como etanol, etanol de 1.ª e 2.ª geração ou bioetanol. Sendo assim, o percentual de bioetanol passaria a representar cerca de 37% do total de biocombustíveis que podem ser obtidos a partir de resíduos da mandioca. Os dados também mostram o elevado potencial da mandioca como biomassa, visto que a mesma aparece em estudos referentes a diversos tipos de biocombustíveis.

Figura 14: Biocombustíveis obtidos a partir de resíduos de mandioca como biomassa no período de 2010 a 2019



Fonte: Autoria própria

Segundo a Abiogás (2020), o Brasil tem o maior potencial de produção de biogás do mundo. O potencial do país é de 120 milhões de m^3 /dia, onde o biogás pode ser gerado a partir de resíduos sólidos urbanos e de subprodutos da cana e da produção de etanol e açúcar, como bagaço, torta de filtro, palha, vinhaça e a partir de outras fontes de biomassa (ABIOGAS, 2020). O potencial do Brasil ainda torna o biogás o biocombustível mais estudado no cenário acadêmico nacional, mesmo se tratando da sua geração a partir de resíduos da mandioca, o que fica mais evidente através do gráfico da figura 14, onde mais de metade dos estudos para geração de biocombustíveis são sobre biogás.

Nesse contexto, fica evidente a importância do estudo da produção de biogás a partir de diversas fontes de biomassa, sobretudo, a partir da mandioca, que se destaca no cenário brasileiro pelo seu potencial agricola. Ademais, o estudo da produção de outros biocombustíveis, que não estejam em muita evidência, como o syngas, também é importante, afim de conhecer o seu potencial energético e sua viabilidade econômica.

O capítulo 6 a seguir disserta sobre os procedimentos metodológicos utilizados para atingirem o objetivo do presente estudo.

6. Metodologia

6.1 Classificação da pesquisa

Segundo Bernardes (2010), a metodologia tem como objetivo principal estabelecer qual o caminho a ser seguido na realização da pesquisa. Pesquisa, segundo Prodanov e Freitas (2013), é um conjunto de ações, propostas com a finalidade de encontrar a solução para um problema, que têm por base os procedimentos racionais e sistemáticos.

A pesquisa pode ser classificada com base na natureza de suas variáveis analisadas, na abordagem do problema, nos objetivos pretendidos e nos procedimentos técnicos utilizados (PRODANOV e FREITAS, 2013).

Assim, o presente trabalho pode ser classificado quanto a sua natureza, como pesquisa aplicada, já que, segundo Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa aplicada tem como finalidade gerar conhecimentos para a aplicação pratica referente a problemas específicos.

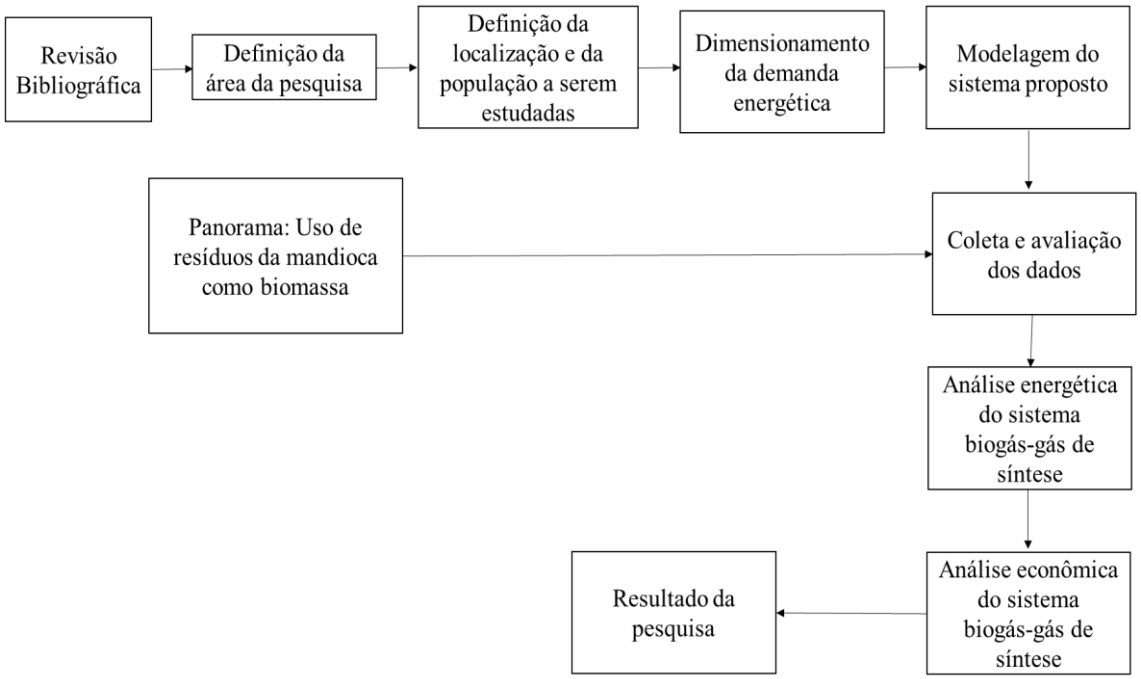
Quanto a abordagem, a pesquisa é do tipo quantitativa. Segundo Prodanov e Freitas (2013), ressaltam que uma pesquisa classificada como quantitativa requer o uso de recursos e de técnicas estatísticas. Com relação aos seus objetivos, pode ser classificada como pesquisa exploratória, uma vez que tem como finalidade proporcionar maior familiaridade com o problema a ser investigado.

6.2 Metodologia e materiais

Para realização da pesquisa, foi elaborado um esquema com as fases da metodologia a serem seguidas, composto de 10 etapas: revisão bibliográfica; definição da área da pesquisa; panorama sobre o uso de resíduos da mandioca como biomassa; definição da localização e da população a serem estudadas; dimensionamento da demanda energética; modelagem do sistema proposto; coleta e avaliação de dados; análise

energética do sistema biogás-gás de síntese; análise econômica do sistema biogás-gás de síntese; resultado da pesquisa. As etapas do método para o desenvolvimento da pesquisa estão sintetizadas na figura a seguir.

Figura 15: Metodologia



Fonte: Elaboração própria

A revisão bibliográfica e o panorama realizado foram tratados nos capítulos 2 e 5 do presente estudo, afim de dissertar a respeito dos biocombustíveis, da mandioca como biomassa e do cenário acadêmico nacional e internacional sobre do tema.

Para analisar o aproveitamento energético a partir do biogás e do gás de síntese, com o intuito de gerar eletricidade para a população isolada escolhida, foi considerado um sistema de produção de bioeletricidade capaz de atender à demanda requerida, conforme determinada a partir do dimensionamento da demanda energética. A análise energética do sistema proposto foi baseada nos conceitos da termodinâmica, especificamente na primeira lei, onde os sistemas são analisados considerando o balanço energético entre os processos.

A análise econômica, também aplicada no estudo, tem por objetivo determinar os aspectos econômicos do sistema proposto e as Equações utilizadas fundamentam-se em valores dos custos de investimento da planta, custos da biomassa, custos de geração de energia, custos de manutenção do sistema e período equivalente de utilização da planta.

6.3 Dimensionamento da demanda energética

A população escolhida para ser beneficiada pela geração de energia através do sistema proposto fica localizada em Cantá, município localizado em Roraima. Segundo Torres (2017), a região Norte do Brasil se destaca pela atividade agrícola, principalmente quando se trata do cultivo da mandioca. O município de Cantá chega a produzir em média 2851 toneladas de resíduos de mandioca por ano (TORRES, 2017).

Vila União, localizada em Cantá, foi o local escolhido para fins deste estudo. Vila união é habitada por uma população isolada de aproximadamente 200 habitantes, que não possuem acesso à energia elétrica (IBGE, 2019).

Na figura a seguir é possível observar uma imagem aérea do local escolhido para o estudo.

Figura 16: Vila União, município de Cantá, Roraima, Brasil



Fonte: Google Street View

Ademais, Roraima foi escolhida como região para fins deste trabalho por ser o único estado do país fora do Sistema Interligado Nacional (SIN), fazendo com que a região dependesse por anos do fornecimento de energia da Venezuela (MME, 2020).

Para calcular a demanda de energia elétrica da comunidade descrita anteriormente, foi utilizada a Equação 1:

$$D_E = \frac{D_h \cdot Q_h}{T} \quad (1)$$

Onde:

D_E - Quantidade de energia elétrica demandada pela comunidade [kW];

D_h - Demanda per capita por habitante da região [kWh/hab.ano];

Q_h - Número total de habitantes da região [hab];

T - Total de horas no ano [horas/ano].

6.4 Considerações adotadas para o sistema proposto

A Tabela 7 a seguir contém as considerações adotadas para o sistema proposto.

Tabela 7: Considerações adotadas no sistema proposto

Componentes do Sistema	**Tipo**	**Fabricante**
Biorreator	Anaeróbico	PUXIN (PX-CATS-1)
Gaseificador + Ciclone	Downdraft	HAIQI (LX-3000)
Purificador de biogás	H_2S Removedor	Suiry
Misturador de gases	Gas Mixer HX	Huaxin
Motor de Combustão Interna	56kW (Convencional)	Deutz

Fonte: Elaboração própria

O sistema proposto é composto de um biodigestor anaeróbico, um gaseificador downdraft com um ciclone removedor acoplado + sistema de acondicionamento do gás de síntese, um purificador de gases sendo um removedor de H_2S para purificar o biogás, um misturador de gases e um motor de combustão interna. As Tabelas (8) a (12) apresentam os dados técnicos do motor, do misturador e do purificador, escolhidos para compor o sistema proposto.

Tabela 8: Dados técnicos do motor Deutz ND68D5

	Valor
Potencia nominal [Kw]	56
Taxa de compressão	11,5
Velocidade nominal [rpm]	1500
Diâmetro x Curso [mm]	105 x 130
Consumo de combustível [m³/h](90 %)	26,5
Consumo de combustível [m³/h] (100 %)	29,3
CHP [kW]	83,2

Fonte: Adaptada do Manual técnico Deutz

Tabela 9: Dados técnicos do misturador HX - Huaxin

Informação	**Valor**
Capacidade [m³/h]	0 a 1000
Gases	Todos os gases
Alcance da mistura [%]	0 a 25 ou 0 a 100

Fonte: Adaptada do Manual técnico Huaxin

Tabela 10: Dados técnicos do Suiry purificador de biogás

Informação	**Valor**
Método	Dessulfuração
Teor de metano [%]	50
Teor de óxido férrico [%]	25 a 33
Porosidade [%]	50 a 60

Fonte: Adaptada do Manual Suiry

Tabela 11: Dados técnicos do Bioreator

Informação	**Valor**
Gáses de saída [m³/dia]	30 a 4000
Capacidade [t/dia]	0,350 a 50

Fonte: Adaptada do Manual

Tabela 12: Dados técnicos do gaseificador

Informação	**Valor**
Gáses de saída [m³/h]	30 a 1500
Potência [kW]	30
Taxa de produção [%]	90

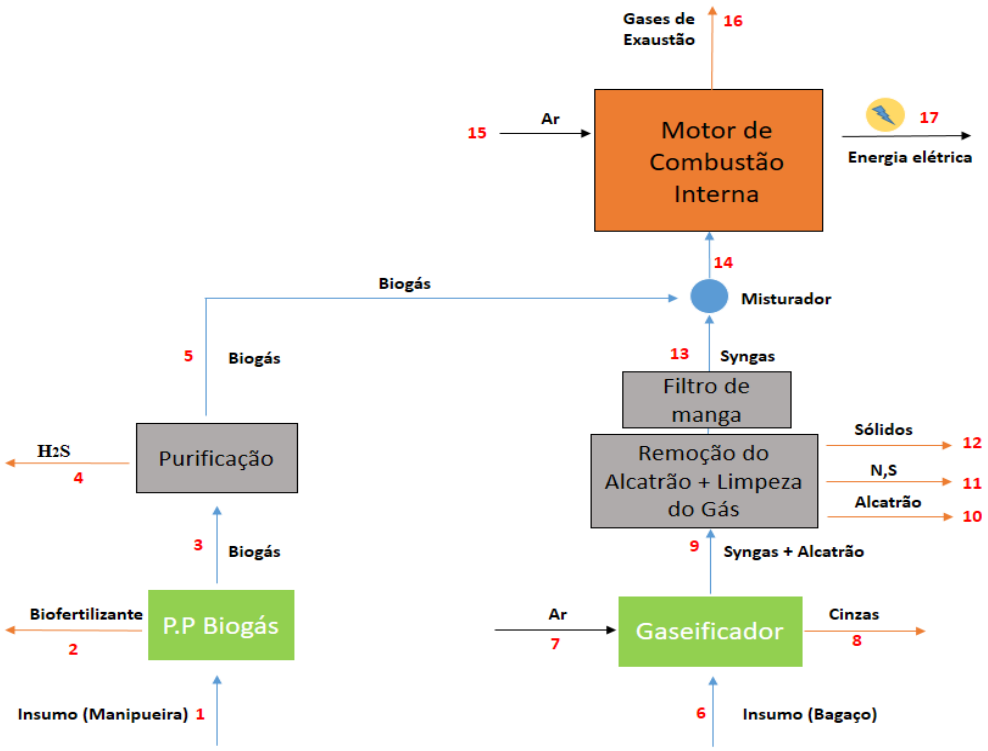
Fonte: Adaptada do Manual

6.5 Sistema proposto

Para melhor compreensão da análise do sistema proposto, é construído um diagrama conforme mostra a Figura 12, onde se observa a função de cada unidade individual e do sistema como um todo.

O sistema proposto é composto de uma planta de biogás e de um gaseificador, ambos interligados a um sistema de purificação. Após serem purificados, os gases gerados são introduzidos em um misturador e posteriormente em um motor de combustão interna, para geração de energia elétrica. A Figura 17 a seguir traz a planta do sistema proposto, suas etapas e seus fluxos de entrada e saída.

Figura 17: Sistema de geração de bioeletricidade proposto para a comunidade isolada de Vila União



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

O fluxo 1 do sistema, representa a manipueira, introduzida na planta geradora de biogás composta por um biorreator, onde o biogás (fluxo 3) e os biofertilizantes (fluxo 2) serão produzidos. Posteriormente, o biogás é purificado, onde há extração do sulfeto de hidrogênio (H_2S), representado pelo fluxo 4, tornando o biogás mais puro e livre de impurezas, ficando adequado para uso no conjunto motor de combustão interna/gerador elétrico. O fluxo 6, representado pelo bagaço da mandioca, alimenta o gaseificador, o qual também recebe-se ar (fluxo 7). No gaseificador há produção de gás de síntese (fluxo 9), que passa por um sistema de remoção de alcatrão, fundamental para não danificação do conjunto MCI/gerador. Nessa etapa, alcatrão, nitrogênio, enxofre e sólidos são eliminados, representados pelos fluxos 10, 11 e 12, respectivamente. Após passar pela primeira etapa de limpeza, o gás de síntese passa por um filtro de manga onde se elimina o resto do material particulado para garantir as condições mínimas necessárias (vide Tabela 3) que permitam seu posterior uso no conjunto motor/gerador para a geração de

eletricidade. O sistema proposto não considera a reutilização e o descarte dos fluxos 10, 11 e 12.

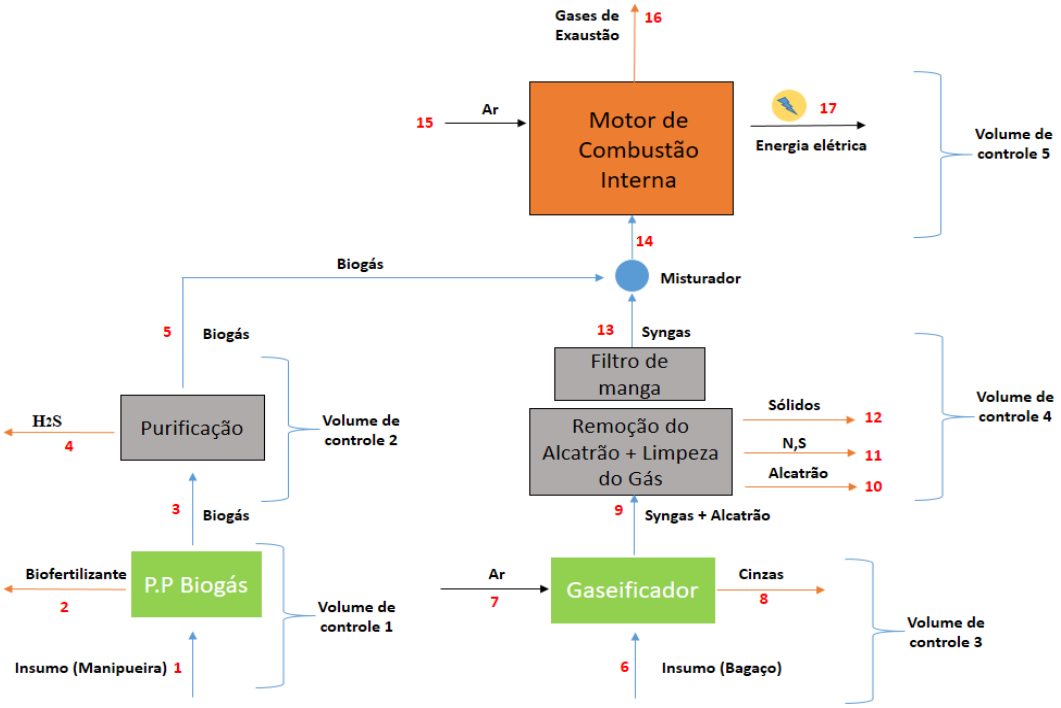
Referente à remoção do alcatrão e das demais substâncias no fluxo 9, consideraram-se os valores para alcançar uma operação satisfatória no MCI. Segundo Boloy (2010), gaseificadores do tipo *Downdraft* apresentam menores índices dessas espécies no gás produzido, quando comparado com outros tipos, devido ao craqueamento desse na região de oxidação. Para fins deste estudo e da análise do sistema, considerou-se um conteúdo de partículas menor que 50 mg/m³ e conteúdos de alcatrões menores que 100 mg/m³, considerados aceitáveis para operação em MCI (KALTSCHMITT e HARTMANN, 2001).

Os fluxos 13 e 5 são introduzidos em um misturador. Após misturados, geram o fluxo 14, que representa o gás resultante da mistura, que entra no motor de combustão interna, para geração de energia elétrica (fluxo 17). O sistema proposto não considera a reutilização dos gases de exaustão para geração de energia, tampouco o descarte ou a reutilização dos outros fluxos de saída que não sejam energia elétrica, conforme destacado na seção 8.1 deste estudo.

6.6 Análise energética do sistema

A partir do sistema proposto (Figura 17), é elaborada a Tabela 17, que contém os parâmetros termodinâmicos (vazão, pressão, temperatura, entalpia, entropia, energia específica) do sistema proposto. Todas os parâmetros estão associados a cada volume de controle do sistema e seus respectivos fluxos, destacados no diagrama da figura 18.

Figura 18: Volumes de controle e pontos do sistema



Fonte: Elaboração própria

A análise energética, baseada na Lei da conservação de massa e de energia, é utilizada para determinar a eficiência energética de um sistema. Sendo assim, se faz necessário definir os respetivos volumes de controle e seus pontos. O balanço de massa no volume de controle é representado pela Equação (2).

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = 0 \qquad (2)$$

Onde:

$\dot{m}_e$ – Vazão massica de entrada [kg/s];

$\dot{m}_s$ – Vazão mássica de saída [kg/s].

A partir da Primeira Lei da Termodinâmica é realizada a análise da conservação de energia. Segundo ela, a variação da energia interna de um sistema é expressa por meio da diferença entre a quantidade de calor trocada com o meio ambiente e o trabalho

realizado. Desprezando as variações de energia cinética e potencial, para um volume de controle em regime permanente, a primeira lei da termodinâmica pode ser escrita como a Equação (3) (Reis, 2017).

$$Q_{VC} - W_{VC} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0 \quad (3)$$

Sendo:

Q_{vc} - taxa de transferência de calor no volume de controle [kW];

W_{vc} - potência ou trabalho no volume de controle [kW];

h_e - entalpia específica na entrada do volume de controle [kJ/kg];

h_s - entalpia específica na saída do volume de controle [kJ/kg].

O balanço de energia realizado, considera a energia que entra no gaseificador, sendo igual à que sai. Assim, utiliza-se a entalpia para quantificar a energia térmica por unidade de massa de ar, o gás e as cinzas (CORONADO; SILVEIRA; ARAUZO; 2006). Desta forma, o balanço energético do sistema pode ser descrito por meio da Equação (4).

$$\dot{m}_b . h_b + \dot{m}_a . h_a = \dot{m}_g . h_g + \dot{m}_{cen} . h_{cen} + Q_{ma} \quad (4)$$

Sendo:

$\dot{m}_b$ - Fluxo de biomassa que entra ao gaseificador [kg/h];

$\dot{m}_g$ - Fluxo de gás produzido na gaseificação [kg/h];

$\dot{m}_a$ - Fluxo de ar introduzido ao gaseificador [kg/h];

$\dot{m}_{cen}$ - Fluxo de cinzas [kg/h];

Q_{ma} - Calor perdido ao meio ambiente [kW];

h_b - Entalpia da biomassa [kJ/kg];

h_g, h_a - Entalpia do gás e do ar [kJ/kg];

h_{cen} - Entalpia das cinzas [kJ/kg].

Para dar sequência a elaboração da análise energética, foi determinada a entalpia do gás produzido, por meio das Equações (5) e (6) (CORONADO; SILVEIRA; ARAUZO; 2006).

$$h_g = C_{CO2}.h_{CO2} + C_{CH4}.h_{CH4} + C_{H2}.h_{H2} + C_{N2}.h_{N2} + C_{O2}.h_{O2} + C_{CO}.h_{CO} + C_{H2O}.h_{H2O} \quad (5)$$

$$h = h_f + \int_{298}^{Tf} Cp.dT \quad (6)$$

Sendo:

h_g- Entalpia do gás [kJ/kg];

C – Concentração volumétrica do gás produzido

h_f – Entalpia de formação [kJ/kg]

T – Temperatura do gás produzido [°K]

Cp – Calor específico a pressão constante do gás produzido [kJ/kg.K]

Para determinar a entalpia das cinzas, foi utilizada a Equação (7) (BOLOY, 2010).

$$h_{cinzas} = \frac{Dh}{24{,}28} \quad (7)$$

Sendo:

Dh – Direrença de entalpia [kJ/kg].

6.7.1 Cálculo da vazão de ar no MCI

Para o cálculo da vazão de ar que entra no MCI e da vazão dos gases de exaustão no MCI é preciso estimar a relação ar/combustível que varia entre 10 e 13 (BOLOY, 2010). Para fins deste estudo considerou-se a relação ar/combustível como 12 (Equação (8)).

$$R = \frac{\text{Ar}}{\text{Combustível}} \quad (8)$$

6.7.2 Cálculo da vazão de biocombustível

Para uma análise inicial do sistema proposto (Figura 13), foi calculada a demanda necessária de biocombustível para alimentar o motor de combustão interna. O primeiro ponto a ser determinado no volume de controle 5 do sistema proposto é a vazão necessária para alimentar o MCI, segundo a demanda energética necessária para abastecer a população, conforme dito anteriormente na seção 5.1 deste estudo.

Para calcular a estimativa do consumo de combustível, considerando o uso de um motor de combustão interna ciclo Otto, alimentado com biogás e syngas, utilizaram-se as Equações (9) a (11) (CHAVES *et al.*, 2020).

$$\eta_{mci} = \frac{\text{EP}}{(\text{Ps.Essyngas})+(\text{Pb.Esbiogas})} \tag{9}$$

$$Essyngas = \dot{m}_{Syngas} \, . \, PCI_{Syngas} \tag{10}$$

$$Esbiogas = \dot{m}_{Biogas} \, . \, PCI_{Biogas} \tag{11}$$

Sendo:

η_{mci} – Eficiência térmica do motor;

EP – Potência do motor [kW];

$Essyngas$ – Potência suprida pelo syngas [kW];

$Esbiogas$ – Potência suprida pelo biogás [kW];

$\dot{m}_{Syngas}$ – Vazão do syngas [kg/s];

$\dot{m}_{Biogas}$ – Vazão do biogás [kg/s];

PCI_{Syngas} – Poder calorifico inferior do syngas [kJ/kg];

PCI_{Biogas} - Poder calorifico inferior do biogás [kJ/kg];

Ps – Porcentagem para potência suprida pelo syngas [%];

Pb - Porcentagem para potência suprida pelo biogás [%].

Com as Equações citadas anteriormente e os seus respectivos resultados, é possível encontrar a vazão do biogás e do syngas necessárias para alimentar o motor e atender a demanda necessária segundo a Equação 1.

Através da Equação 9, é possível encontrar a vazão necessária em 3 cenários com parâmetros de entrada definidos para o estudo: um utilizando 75% de Gás de síntese e 25% de biogás, o segundo utilizando 50% de gás de síntese e 50% de biogás e o último utilizando 25% de Gás de síntese e 75% de biogás.

6.7.3 Metodologia para cálculo do PCI do gás de síntese

Conhecida a composição da biomassa utilizada no processo de gaseificação, é possível determinar a composição do gás produzido e seu PCI. A composição do gás de síntese produzido foi determinada no ambiente computacional Matlab® para Windows 10. O software interativo de alta performance, voltado para o cálculo numérico, permite determinar a composição do gás produzido através da gaseificação, segundo código fonte desenvolvido por J.R.COPA (2018).

A Equação utilizada no Matlab® para determinar o valor do PCI foi determinada segundo Lora e Nogueira (2003). Uma vez determinada à composição química do gás de síntese, e desprezando as concentrações de C_2H_4 e C_2H_6, pode-se calcular o PCI do mesmo, utilizando a Equação (12).

$$PCI_{gásdesintese} = 0{,}126C_{CO} + 0{,}358C_{CH4} + 0{,}108\,C_{H2} \quad (12)$$

6.7.4 Eficiência global do sistema

O sistema proposto envolve a geração de bioenergia a partir do uso de biocombustíveis, produzidos com resíduos oriundos do processamento da mandioca, desta forma, a eficiência global do sistema (η_G) é definida levando em consideração as energias produzidas (CHAVES *et al*., 2020). Para definir a eficiência global do sistema, utilizou-se a Equação (13), adaptada de Coronado (2011).

$$\eta_G = \frac{Ep}{Ecomb} \tag{13}$$

6.8 Análise econômica do sistema

Para atingir os objetivos da análise econômica deste estudo, foi adaptada a metodologia aplicada por diversos autores (CHAVES *et al*., 2020; DENTELLO 2017; XAVIER 2016; BOLOY *et al*., 2011; 2010). A partir da metodologia adaptada é possível encontrar o custo de produção de eletricidade do sistema proposto.

A viabilidade econômica do sistema depende dos custos energéticos, valor de investimento do biodigestor, valor de investimento do gaseificador, valor do investimento do conjunto motor/gerador, valor do investimento do misturador, custo de manutenção, taxa de juros do mercado e período equivalente de utilização. A metodologia utilizada no presente estudo e por alguns autores como Boloy (2010) e Dentello (2017), não considera os custos de armazenagem e distribuição de energia, capital de giro e impostos.

O custo de energia elétrica do subsistema considera o custo de investimento da planta, multiplicando-se o investimento do subsistema pelo fator de anuidade, adotando um período de amortização de 10 anos, para ter conhecimento do valor do dinheiro no tempo, durante esse período. Os custos de produção de energia elétrica dos subsistemas são obtidos a partir das Equações 14 e 15 adaptadas (BOLOY 2010; LARANCI *et al*., 2012; DENTELLO, 2017).

$$C_B = \left[\frac{I_{pb} \cdot f}{H.E_{sbiogas}}\right] + \left(\frac{C_{manipueira}.E_{comb}}{E_{sbiogas}}\right) + C_{manB} \quad (14)$$

Sendo:

I_{pb} – Investimento da planta biogás [US$];

f - Fator de anuidade baseado na taxa de juros [1/ano];

H - Período equivalente de utilização [horas/ano];

$C_{manipeuira}$ - Custo da manipueira [US$/kWh];

E_{comb} – Energia suprida pela manipueira [kWh];

$E_{sbiogas}$ – Potência suprida pelo biogás [kWh];

C_{manB} - Custo de manutenção do subsistema a biogás [US$/kWh];

C_B – Custo de produção do biogás [US$/kWh].

$$C_S = \left[\frac{I_{pgs} \cdot f}{H.E_{ssyngas}}\right] + \left(\frac{C_{bagaço} \cdot E_{comb}}{E_{ssyngas}}\right) + C_{manGS} \quad (15)$$

Onde:

I_{pgs} – Investimento da planta gás de síntese [US$];

f - Fator de anuidade baseado na taxa de juros [1/ano];

H - Período equivalente de utilização [horas/ano];

$C_{bagaço}$ - Custo do bagaço [US$/kWh];

E_{comb} - Energia suprida pelo bagaço de mandioca [kWh];

$E_{ssyngas}$ – Potência suprida pelo syngas [kWh];

C_{manGS} - Custo de manutenção do gaseificador [US$/kWh];

C_S – Custo de produção do singás [US$/kWh].

O investimento da planta para produção de biogás foi calculado somando o investimento do biodigestor, do purificador e do motor, conforme a Equação adaptada (16).

$$I_{pb} = I_{purificador} + I_{biodigestor} + I_{motor} \quad (16)$$

Sendo:

$I_{purificador}$ - Investimento no purificador [US$];

$I_{biodigestor}$ - Investimento no biodigestor [US$];

I_{motor} - Investimento no MCI [US$];

I_{pb} - Investimento na planta de biogás [US$].

O investimento para planta de produção de gás de síntese foi calculado somando o investimento do purificador e do gaseificador, conforme a Equação (17).

$$I_{pgs} = I_{purificador} + I_{gaseificador} \quad (17)$$

Onde:

$I_{purificador}$ - Investimento no purificador [US$];

$I_{gaseificador}$ - Investimento no gaseificador [US$];

I_{pgs} - Investimento na planta de produção de gás de síntese [US$].

Para o cálculo do fator de anuidade, serão utilizadas as Equações (18) e (19) (DENTELLO, 2017; MOURA, 2020).

$$f = \frac{q^k(q-1)}{q^k-1} \quad (18)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (19)$$

Sendo:

f: Fator de anuidade;

k: Período de amortização [anos];

r: Taxa de juros anual [% a.a.].

A partir das Equações (20), (21) e (22), é calculado o custo de energia elétrica produzida no sistema biogás-gás de síntese.

$$C_{el} = \left[\frac{(I_{pgs}+I_{pb}+I_{motor}).f}{H.E_p}\right] + \left(\frac{C_s.FP_{GS}+C_B.FP_B}{E_p}\right) + C_{manMotor} \quad (20)$$

$$FP_B = \frac{E_{pB}}{E_{pB}+E_{pS}} \quad (21)$$

$$FP_S = \frac{E_{pS}}{E_{pB}+E_{pS}} \quad (22)$$

Sendo:

FP_B = Fator de ponderação para o biogás produzido;

FP_{Gs} = Fator de ponderação para o gás de síntese produzido;

E_{pB} = Energia produzida pelo biogás [kWh];

E_{pS} = Energia produzida pelo gás de síntese [kWh];

$C_{manMotor}$ = Custo de manutenção do motor [US$/kWh].

I_{pgs} - Investimento na planta de produção de gás de síntese [US$];

I_{pb} - Investimento na planta de biogás [US$];

I_{motor} - Investimento no MCI [US$];

H - Período equivalente de utilização [horas/ano];

C_{el} - Custo de energia elétrica produzida no sistema proposto [US$/kWh];

C_B – Custo de produção do biogás [US$/kWh];

C_S – Custo de produção do singás [US$/kWh].

6.8.1 Receita anual esperada

Para calcular a viabilidade econômica de um projeto, além do custo de energia elétrica, são utilizados indicadores que permitem determinar se o projeto em questão atende os requisitos econômicos e financeiros esperados. Dentre os diversos utilizados, os mais comuns são: VPL (valor presente líquido), *Payback* e TIR (taxa interna de retorno).

Payback ou prazo de recuperação de investimento, é um indicador utilizado que permite calcular o período (prazo) que o investidor irá precisar para recuperar o capital investido.

Segundo Lima *et al*. (2013), existem dois tipos de indicadores *payback*, o simples e o descontado. Esses diferenciam-se entre si pelo segundo considerar o valor do dinheiro no tempo.

Segundo Rasoto *et al*. (2012), o *payback* descontado expressa o período de tempo necessário para que as entradas de caixa se igualem ao que foi inicialmente investido, podendo ser considerado uma medida de risco do projeto. Dessa forma, quanto menor o *payback* de um projeto, menor o risco do investimento.

Dessa forma, para determinar o *Payback*, é utilizada a Equação (23) modificada, a qual define o rendimento anual esperado (MOURA, 2020).

$$R_S = E_S . H_S . (T_{el} - C_{elS}) \quad (23)$$

Sendo:

R_S = receita anual do sistema [US$/ano];

H_s = período equivalente de utilização do sistema [horas/ano];

T_{el} = tarifa da eletricidade da concessionária local [US$/kWh];

C_{elS} = custo da energia elétrica produzida no sistema [US$/kWh];

E_S = energia produzida pelo sistema [kWh].

7. Resultados e Discussão

7.1 Resultado da análise dos gases produzidos

Conforme mencionado na etapa 6.1, o presente estudo não possui caráter experimental, não tendo sido realizado testes de produção de biogás e gás de síntese em laboratório. Os valores foram considerados segundo as referências e Equações, descritas na etapa 6.7.2 e 6.7.3.

Através da metodologia descrita na etapa 6.7.3 deste estudo foi possível determinar a composição do gás de síntese e seu PCI. Para a composição do biogás segundo sua origem (mandioca), foi utilizada a composição segundo LINS e FERNANDES (2015). Para determinar o PCI referente ao biogás, foram considerados os valores segundo (LIMA e PASSAMANI, 2012).

As Tabelas 13 e 14 contém as informações para suas composições e poder calorífico inferior.

Tabela 13: Composição (Gás de síntese)

Espécie	% vol
H_2 (%)	14,2
CO (%)	11,57
CO_2 (%)	17,83
CH_4 (%)	7,24
N_2 (%)	49,16
PCI (kJ/kg)	5.580

Fonte: COPA, 2018; MATLAB

Tabela 14: Composição (biogás)

Espécie	% vol
CH_4	54,3
CO_2	44,9
H_2	3,5
PCI (kcal/kg)	3.827
PCI (kJ/kg)	16.027

Fonte: LINS; FERNANDES, 2015; LIMA; PASSAMANI, 2012

Conforme apresentado na Tabela 14, o PCI do biogás equivalente a 3.827 kcal/kg é considerado segundo a quantidade de metano presente em sua composição. Segundo Lima e Passamani (2012), um biogás com uma concentração de metano de 54,3% em sua composição, possui um PCI correspondente a 3.827 kcal/kg.

7.2 Resultado da análise energética

7.2.1 Considerações adotadas para a análise energética

A Tabela 15 a seguir apresenta os dados adotados para realizar a análise energética do sistema.

Tabela 15: Valores adotados no cálculo da vazão de combustível

Coeficiente	Valor	Unidade	Referência
η_{mci}	35	%	PROBIOGÁS, 2015
D_E	50	kW	Equação 1
$\dot{m}_{gás}$	26,5	m³/h	DEUTZ, 2016
PCI_{Syngas}	5580	kJ/kg	Equação 12
PCI_{Biogas}	16027	kJ/kg	(LIMA; PASSAMANI, 2012).

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 15, o valor referente a eficiência térmica do motor, foi utilizada conforme encontrado na literatura, referente a um motor ciclo otto. Para fins de análise, foi utilizado um motor da marca Deutz, com potência de 50kW, para atender a demanda da população (Equação 1). O valor adotado para fins do cálculo, referente a vazão necessária, foi retirado do manual de especificação técnica do motor, onde para operar a

uma potência de 50kW, a vazão necessária de gás metano é de 26,5 m³/h. O valor referente a vazão do gás de síntese necessária, foi encontrado através das Equações (9) e (10).

Conhecida a composição molecular do combustível é possível estimar o valor de PCI, em MJ/Nm³. Para determinação do PCI referente ao syngas, utilizou-se a Equação (12), considerando a composição do gás oriundo do bagaço da mandioca como biomassa. O valor adotado para o PCI referente ao biogás proveniente da manipueira, foi baseado na literatura, segundo estudo realizado por Lima e Passamani, 2012, onde o PCI é determinado segundo a composição do biogás.

Para os demais valores adotados visando determinar os parâmetros termodinâmicos do sistema, apresentados na Tabela 18, a saber: temperatura e pressão, foram utilizados dados obtidos de (CHAVES *et al.*, 2019), (GODOY JÚNIOR; SILVEIRA; GIACAGLIA 2014), (CORONADO; SILVEIRA; ARAUZO, 2006), (BOLOY 2010), (LAMAS, 2007). Os demais dados como entalpia, foram encontrados a partir das Equação (4) e (5), retirados da literatura citada anteriormente ou calculados pelo programa CATT2 (BORGNAKKE; SONNTAG; VAN WYLEN, 2003).

Para determinar a entalpia referente a manipueira, utilizou-se o programa CATT2 considerando a metodologia adaptada de Lamas (2007), onde em uma substância contendo em seu percentual mais de 70 % água, pode-se considerar a mesma como água, para fins de cálculo da entalpia com uso do programa.

7.2.2 Vila União: Demanda energética

Conforme discutido na seção 6.3 deste estudo, conhecer a demanda energética da comunidade escolhida é o primeiro passo para a análise energética e para a escolha do motor-gerador.

O primeiro ponto a ser determinado é a quantidade de energia elétrica demandada pela comunidade escolhida. Essa foi obtida a partir de um valor médio de consumo para a região. Segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2019), apresenta um valor equivalente a 2.107 kWh/hab.ano de demanda per capita para o estado de Roraima, onde se localiza a população escolhida (EPE, 2019).

O produto da demanda per capita por habitante do estado e o número total de habitantes da região igual a 200 pessoas (IBGE 2019), resulta uma demanda anual da comunidade em kWh/ano. Após encontrar a demanda anual, divide-se o valor por 8.760 h/ano, referente ao número total de horas no ano, obtendo-se a demanda energética da comunidade em kW.

Desta forma, a partir da Equação 1, concluiu-se que a demanda energética necessária para abastecer a comunidade é de aproximadamente 50 kW.

Para suprir a demanda necessária, foi escolhido para fins deste estudo um conjunto motor-gerador com potência nominal de 56 kW, da marca Deutz.

7.2.3 Vazão mássica de combustível e biomassa

Tendo conhecimento da demanda necessária e do motor escolhido, por meio da Equação (9) e conforme descrito na seção 6.7.2, encontraram-se três cenários possíveis para vazão de biocombustível necessário para alimentar o motor, de acordo com as frações de potência nominal escolhidas. Os valores são indicados na Tabela 16 a seguir.

Tabela 16: Vazão de combustível e energia suprida

$\dot{m}_{biogas}$ [m³/h]	$\dot{m}_{syngas}$ [m³/h]	% (Pb)	% (Ps)
11,02	15,62	75	25
9,27	22,23	50	50
8,31	24,54	25	75

Fonte: Elaboração própria

Assumindo os valores de PCI encontrados e transformando as vazões em kg/s, foi possível encontrar a energia suprida pelo combustível por meio da Equação (23). A potência suprida pelo combustível é dada por:

$$E_{Comb} = \dot{m}_{comb}.PCI_{comb} \quad (23)$$

Sendo:

$\dot{m}_{comb}$: Fluxo mássico do combustível [kg/s];

PCI_{comb}: Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg].

A Tabela 17 a seguir contém a vazão mássica de combustível em kg/s e a potência suprida pelo combustível nos respectivos cenários propostos.

Tabela 17: Vazão mássica de combustível

	$\dot{m}_{biogas}$ [kg/s]	$\dot{m}_{syngas}$ [kg/s]	Esbiogás [kW]	Essyngas [kW]	Escomb [kW]
Cenário 1	0,0022	0,0031	35,3	17,4	53
Cenário 2	0,00185	0,0044	30	24,8	55
Cenário 3	0,0017	0,0049	26	27,4	54,1

Fonte: Elaboração própria

Por meio da Tabela 17 foi possível verificar que o cenário 2 atinge uma potência suprida pelo combustível maior que os outros 2 cenários, necessitando de uma vazão de 0,00185 kg/s para o biogás e 0,0044 kg/s para o gás de síntese, atingindo uma potência de 55 kW.

A partir das informações descritas na etapa 6 desse estudo, foi elaborada a Tabela 18, que contém todas as características termodinâmicas do sistema proposto.

O cenário escolhido para fins deste estudo, foi o cenário 2, pelo fato de ter atingido o maior valor de energia total gerada e também devido à requisição de uma quantidade equilibrada de biogás e de syngas, aumentando a melhora na qualidade do gás, por possuir uma maior concentração de hidrogênio em sua composição. Buscou-se também trabalhar com uma quantidade equilibrada de vazão de biomassa, reforçando a escolha pelo cenário 2, para fins deste trabalho. As características referentes a cada ponto do processo se encontram na Tabela a seguir.

Tabela 18: Resultado da análise energética do sistema.

Ponto	Fluido	Vazão [kg/s]	Pressão [MPa]	Temperatura [K]	Entalpia especifica [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]	Potência [kW]
1	Manipueira	0,03	0,200	298,15	105	-	3
2	Biofertilizante	0,02	0,200	299,15	109,2	-	2
3	Biogás	0,0018	0,160	298,15	536,6	16027	30
4	H_2S	0,00003	0,160	298,15	1073,2	-	0,03
5	Biogás	0,0018	0.160	298,15	536,6	16027	30
6	Bagaço	0,003	0,100 – 1	298,15	6959,5	16500	50
7	Ar	0,004	0,100 – 1	298	225,7	-	1
8	Cinzas	0,003	0,100 – 1	773,15	788,93	-	2
9	Syngas	0,0044	0,100 – 1	773,15	4853,2	5580	25
10	Alcatrão	0,002*	0,100 – 1	773,15	-	-	-
11	N, S	0,00005*	0,100 – 1	773,15	-	-	-
12	Sólidos	0,00005*	0,100 – 1	773,15	-	-	-
13	Syngas	0,004	0,100 – 1	773,15	4853,2	5580	24
14	Mistura dos gases	0,006	0,100 – 1	536,5	-	-	59,6
15	Ar	0,034	0,100	298	297,6	-	10
16	Gases de Exaustão	0,042	0,300	450	157,5	-	7

Fonte: Elaboração própria.

(*) Os valores foram citados em kg/h.

Segundo Barana (2000), um biorreator metanogênico, com uma taxa de alimentação de 3,11 litros por dia de manipueira, produz o equivalente a 130,77 litros de biogás por dia. Em seu processamento, uma tonelada de mandioca processada gera em média nove toneladas de manipueira e 0,93 – 1,12 toneladas de bagaço de mandioca (ZHANG *et al*., 2016). Segundo Madeira *et al.* (2017), 22 toneladas por dia de mandioca processada produzem em média 6,6 milhões de litros de manipueira por ano, essa quantidade equivale à produção de 2160 kg por dia de biogás.

Logo, conclui-se que com uma vazão de 0,03 kg/s, o biorreator gera aproximadamente 0,001 kg/s (9,27 m^3/h) de biogás, o suficiente para suprir a demanda do cenário de vazão escolhida.

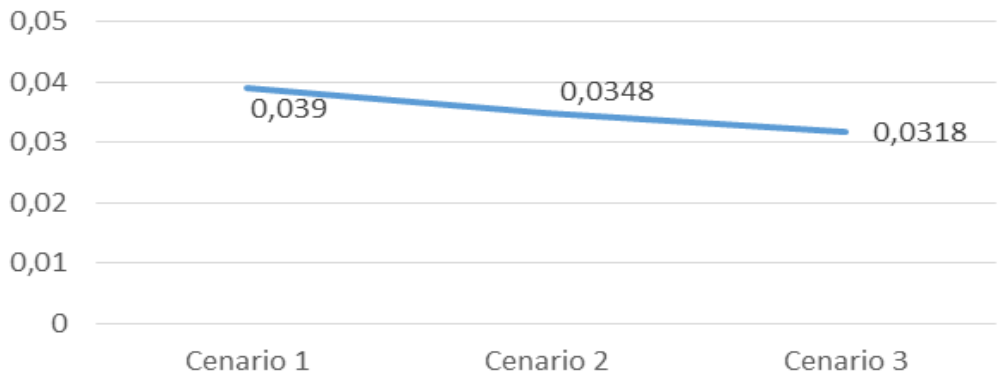
Um gaseificador *downdraft*, alimentado a partir de biomassa lignocelulósica, com uma vazão de 100 kg/h de biomassa, produz em média 214 kg/h de gás de síntese (CORONADO; SILVEIRA; ARAUZO, 2006). Assumindo esses valores e transformando

os dados em kg/s, pode-se chegar a uma vazão de 0,003 kg/s de biomassa necessária para obter uma taxa de produção do gás de síntese de 0,004 kg/s (22,23 m³/h). Em seu estudo, Narnaware *et al*. (2017) encontravam uma taxa de produção de 100 Nm³/h de gás de síntese a partir de 48 kg/h de vazão para biomassa lignocelulósica contendo restos de mandioca. O valor de vazão encontrado dialoga conforme com os valores publicados na literatura. A partir da Equação (4), foi possível encontrar a vazão de saída referente aos volumes de controle 1, 2, 3, 4 e 5.

Para a vazão referente ao ponto 7, considerou-se a relação ar/combustível (biomassa) igual a 155,9 kg/h de ar / 100 kg/h de biomassa, um valor recomendável para a gaseificação (CORONADO; SILVEIRA; ARAUZO, 2006).

A Figura 19 contém o gráfico com os valores das vazões mássicas de ar referentes aos três cenários.

Figura 19: Vazão mássica de ar

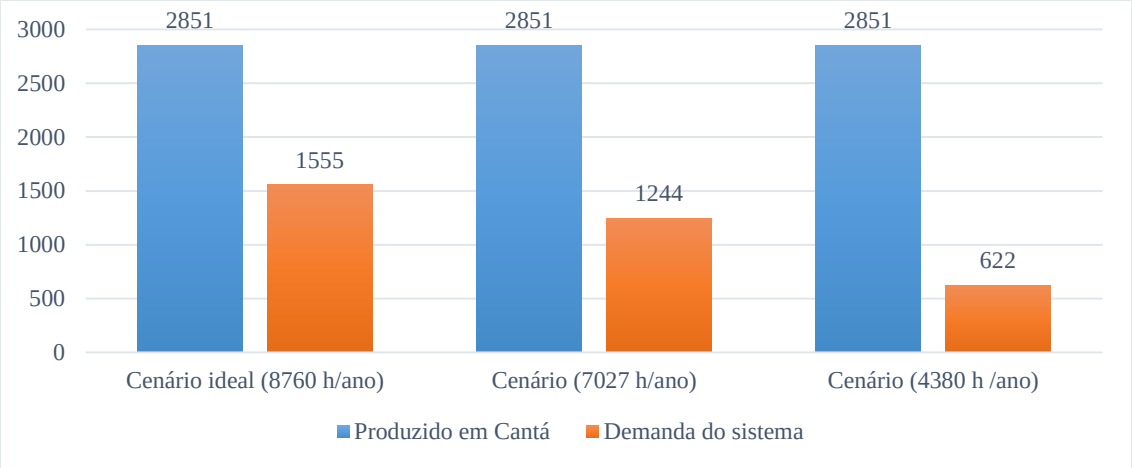


Fonte: Elaboração própria

Na Figura 19, um gráfico é traçado com os valores da vazão mássica de ar que entra no MCI de acordo com os cenários observados no estudo. Encontraram-se valores de ar para os cenários 1, 2 e 3 iguais a 0,039 (kg/s), 0,0348 (kg/s) e 0,0318 (kg/s), respectivamente. Uma redução é notada ao alterar a proporção biogás-syngas, onde os cenários diminuem à proporção de biogás que entra no motor e aumentando a quantidade de syngas que entra no mesmo.

A partir dos valores da vazão mássica presentes na Tabela 18, foi possível determinar a quantidade de biomassa necessária para suprimir a demanda anual do sistema. Segundo Torres (2017), o município de Cantá produz aproximadamente 2851 toneladas de resíduos de mandioca por ano. A partir desses dados, realizou-se um gráfico comparativo para três possíveis cenários, indicado na Figura 20.

Figura 20: Demanda de biomassa (toneladas) disponível x necessária



Fonte: Elaboração própria

Pela análise da Figura 20, verifica-se que nos três cenários propostos a quantidade de biomassa disponível no município é suficiente. No cenário ideal, considerando que o sistema funcione por 24 horas por dia, durante 365 dias por ano, a quantidade de biomassa necessária é 1555 toneladas. Em um segundo cenário, considerando que o sistema funcione por 7027 horas por ano, ou seja, 80% do tempo, a quantidade de biomassa necessária é 1244 toneladas. Já em um cenário alternativo, considerando uma possível escassez de biomassa, foi considerado que o sistema funcione por 4380 horas por ano, ou seja, 50% do tempo, necessitando de 622 toneladas.

7.3 Resultado da eficiência global do sistema

Por meio da Equação (13) foi possível chegar ao valor referente a eficiência global do sistema para o cenário2, conforme descrito na seção 7.2.3. A Tabela a seguir apresenta o resultado e sua comparação com valores da literatura referentes a trabalhos similares.

Tabela 19: Eficiência global do sistema e valores da literatura

Cenário	Eficiência global (%)
2	72,2%
(CORONADO; YOSHIOKA; SILVEIRA, 2011)	51,42%
(CHAVES *et al.*,2019)	72,63%

Fonte: Elaboração própria

Por meio da Tabela 19 pode-se observar o valor referente a eficiência global para o cenário 2 proposto e sua comparação com a literatura. Segundo Chaves *et al.* (2019), em seu estudo, um sistema de geração de energia que usa biogás proveniente da manipueira atingiu uma eficiência global de 72,63%. Em um estudo realizado por Coronado; Yoshioka; Silveira (2011), um sistema de geração de energia, que funciona a partir da gaseificação da biomassa, atingiu uma eficiência global de 51,42%. O valor da eficiência global encontrado está dentro do esperado, quando comparado com valores de estudos que utilizam tecnologias similares. É importante ressaltar que não foi considerado o reaproveitamento dos gases de exaustão produzidos no sistema, o que poderia aumentar ainda mais a eficiência do sistema proposto.

7.4 Resultado da Análise Econômica

7.4.1 Considerações adotadas para a análise econômica

A Tabela a seguir apresenta os valores adotados para o cálculo da análise econômica.

Tabela 20: Valores adotados para o cálculo da análise econômica

Símbolo	Definição	Valor (US$/kWh)	Fonte
Cmanipueira	Custo da manipueira	0,011	Cepea (2020)
Cbagaço	Custo do bagaço	0,056	Cepea (2020)
$Cman$b	Custo de manutenção do sistema biogás	0,008	Dentello (2017)
$Cman$Gs	Custo de manutenção do sistema syngas	0,01	Adaptado de Zuldian (2017)
T_{el}	Tarifa da energia elétrica com impostos	0,31	Roraima Energia (2020)
$C_{manMotor}$	Custo manutenção do motor	0,01	Wu; Wang (2006)

Fonte: Elaboração própria

Desde 2015, as contas de energia passaram a sofrer mudanças, entrando em vigor o sistema de bandeiras tarifárias. O novo sistema é dividido em três modalidades: verde, amarela e vermelha. Cada cor representa a ocasião em que a tarifa recebera um acréscimo ou não no valor da energia, em função das condições de geração de eletricidade (ANEEL, 2015).

Roraima, onde está localizado o município de Cantá, não funciona segundo o sistema de bandeiras por estar localizado em um sistema isolado (ANEEL, 2015). Dessa forma, a tarifa de energia elétrica adotada para o estudo foi segundo o grupo B, classe a4 (zona rural), considerando uma média entre os valores de ponta e fora de ponta, com impostos.

Segundo ANEEL (2019), as taxas de impostos cobradas para o setor elétrico são: PIS, CONFINS e ICMS. A taxa de câmbio utilizada para fins dos cálculos foi: dólar estadunidense (US$) para real (R$) US$ 1 = R$ 5,49 referente ao mês de setembro de 2020 (Infomoney, 2020).

Os custos adotados para a manipueira e para o bagaço foram baseados em um preço de 61,9 US$/ton (Cepea, 2020). Tendo conhecimento da vazão de biomassa necessária, conforme descrito na Tabela 18, foi possível encontrar o valor em US$/kWh da biomassa utilizada no estudo proposto. Os demais valores citados na

Tabela foram retirados da literatura, conforme estudos similares a este já realizados anteriormente. A Tabela 21 apresenta os valores referentes ao investimento feito em cada subsistema e na planta como um todo.

Tabela 21: Valores referente ao investimento da planta

Equipamento	**Marca**	**Referência**		**Valor unitário (US$)**
Biodigestor	PUXIN	Alibaba.com		57.000,00
Purificador	SUIRY	Alibaba.com		1.500,00
Gaseificador *Downdraft* (Ciclone + Filtro de manga)	HAIQI (LX-3000)	Alibaba.com		45.200,00
Misturador	Huaxin	Alibaba.com		3.500,00
MCI	DEUTZ	Alibaba.com		15.600,00
			Subtotal	122.800,00
			Custo de instalação (30 %)	36.840,00
			Total	159.640,00

Fonte: Elaboração própria

Os valores referentes aos equipamentos que compõem o sistema estão atualizados conforme preço praticado no mercado em 2020. Ademais, conforme demonstrado na seção 8.1, referente as limitações do estudo, não foram considerados custos referente ao frete e custos de importação de produtos da China para o Brasil.

Para o valor referente ao custo de instalação do sistema, consideraram-se 30% do valor total do sistema proposto (MOURA, 2020).

7.4.2 Análise dos subsistemas

As Tabelas 22 e 23 apresentam os resultados referentes aos custos de eletricidade para a produção de biogás e para a produção de syngas, em três possíveis cenários referentes as taxas de juros, com taxas de 4 % a.a., 8 % a.a. e 12 % a.a. para um período

de amortização de 10 anos. O sistema apresentado se propõe a trabalhar com um período de funcionamento de 7027 horas/ano, período equivalente a 80 % do tempo anual.

Tabela 22: Custo da eletricidade gerada pela planta de biogás [US$/kWh]

	1 ano	2 anos	3 anos	4 anos	5 anos	6 anos	7 anos	8 anos	9 anos	10 anos
4% a.a.	0,2867	0,1479	0,1017	0,0786	0,0647	0,0554	0,0488	0,0439	0,0400	0,0369
8% a.a.	0,2868	0,1480	0,1018	0,0786	0,0647	0,0555	0,0489	0,0439	0,0401	0,0370
12% a.a.	0,2869	0,1481	0,1018	0,0787	0,0648	0,0556	0,0489	0,0440	0,0401	0,0370

Fonte: Elaboração própria

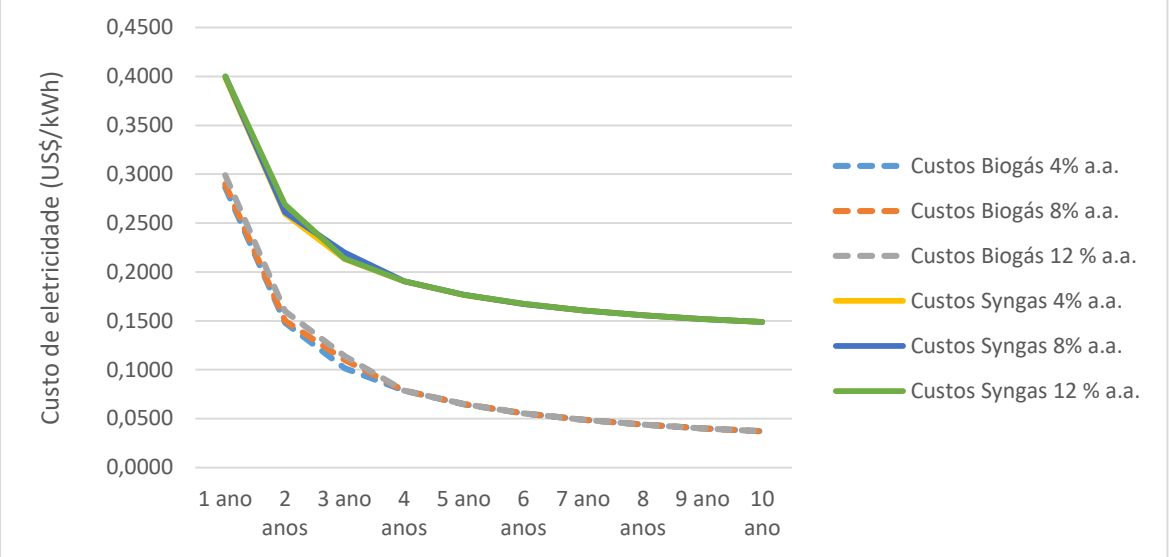
Tabela 23: Custo da eletricidade gerada pela planta de syngas [US$/kWh]

	1 ano	2 anos	3 anos	4 anos	5 anos	6 anos	7 anos	8 anos	9 anos	10 anos
4% a.a.	0,3983	0,2597	0,2135	0,1904	0,1765	0,1673	0,1607	0,1557	0,1519	0,1488
8% a.a.	0,3984	0,2598	0,2136	0,1904	0,1766	0,1673	0,1607	0,1558	0,1519	0,1488
12% a.a.	0,3985	0,2599	0,2136	0,1905	0,1766	0,1674	0,1608	0,1558	0,1520	0,1489

Fonte: Elaboração própria

Observa-se que o custo da eletricidade produzida pela planta de biogás varia de 0,2867 US$/kWh até 0,0370 US$/kWh e para a planta de syngas varia de 0,3983 US$/kWh até 0,1489 US$/kWh. A Figura 21 representa os valores obtidos, conforme Tabela 22 e 23, nos cenários de 4 % a.a., 8 % a.a. e 12 % a.a. para as 2 plantas.

Figura 21: Custo da eletricidade produzida pelos subsistemas para um período de funcionamento de 7027 horas/ano.



Fonte: Elaboração própria

Observa-se na figura 21 que os custos da eletricidade para o subsistema biogás são inferiores aos custos da eletricidade produzida pelo subsistema syngas. Pode-se observar essa diferença nos custos, devido à quantidade de energia produzida pelos subsistemas, onde o subsistema biogás produz uma maior quantidade de energia, quando comparado ao subsistema gás de síntese.

7.4.3 Análise do sistema biogás-gás de síntese

A Tabela 24 a seguir apresenta os resultados referentes aos custos de eletricidade para da planta geradora biogás-Gás de Síntese, combinando as 2 tecnologias, em 3 cenários, com taxas de juros de 4 % a.a., 8 % a.a., e 12 % a.a.

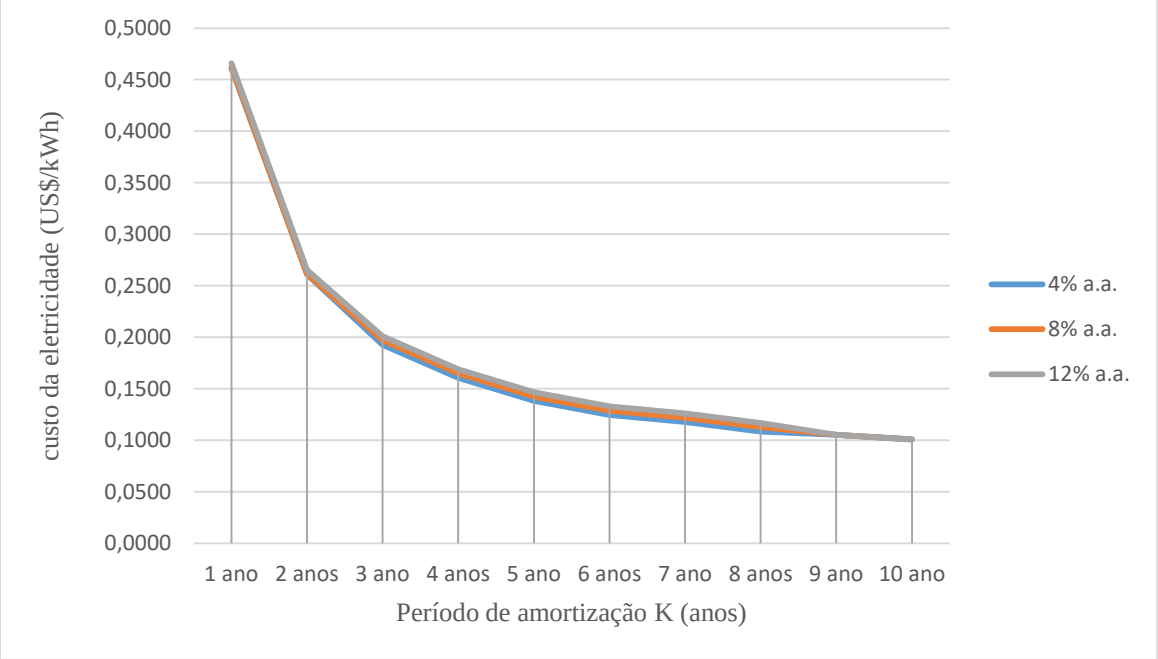
Tabela 24: Custo da eletricidade gerada pelo sistema biogás-gás de síntese (US$/kWh)

	1 ano	2 anos	3 ano	4 anos	5 anos	6 anos	7 anos	8 anos	9 anos	10 anos
4% a.a.	0,4611	0,2609	0,1942	0,1608	0,1408	0,1274	0,1179	0,1108	0,1052	0,1007
8% a.a.	0,4613	0,2610	0,1943	0,1609	0,1409	0,1275	0,1180	0,1109	0,1053	0,1008
12% a.a.	0,4614	0,2611	0,1944	0,1610	0,1410	0,1276	0,1181	0,1109	0,1054	0,1009

Fonte: Elaboração própria

Observa-se que o custo da eletricidade produzida para a planta biogás-gás de síntese, quando as 2 tecnologias são combinadas, varia de 0,4614 US$/kWh até 0,1007 US$/kWh. A Figura 22 representa os valores obtidos, conforme Tabela 24, nos cenários de 4 % a.a., 8 % a.a. e 12 % a.a.

Figura 22: Custo da eletricidade produzido pelo sistema biogás-gás de síntese para um período de funcionamento de 7027 horas/ano.



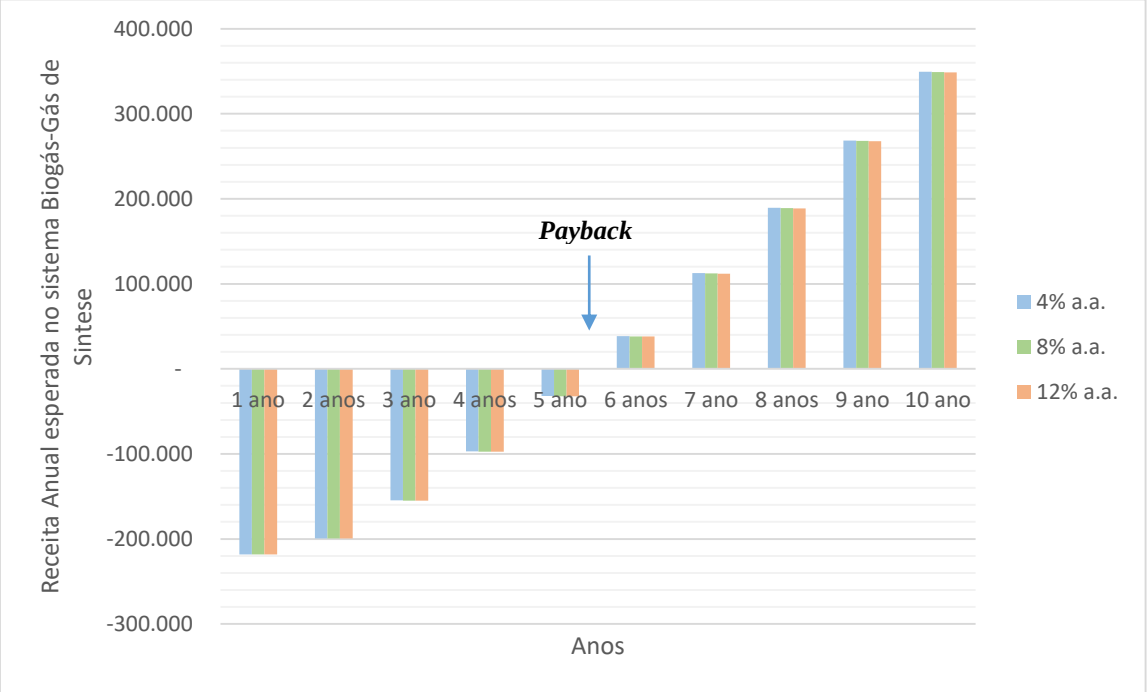
Fonte: Elaboração própria

Através da Figura 22, pode-se observar que o custo da energia elétrica produzida no sistema biogás-gás de síntese varia, diminuindo a medida que o tempo aumenta, em decorrência do período de amortização e do fator de anuidade que incidem sobre o valor do investimento inicial, influenciando os custos no decorrer dos 10 anos.

7.4.4 Resultado da receita anual (*payback*)

A Figura 23 apresenta o resultado referente ao tempo de retorno para o investimento utilizado na planta biogás-gás de síntese. Para determinar o valor do *payback* simples, através da Equação (23), foram utilizados os custos de eletricidade da planta biogás-gás de síntese, conforme Tabela (24), custo da tarifa de energia elétrica local, conforme Tabela (20), período de horas de operação do sistema (7027 horas/ano) e energia gerada conforma cenário 2.

Figura 23: Receita Anual esperada no sistema de geração biogás-gás de síntese



Fonte: Elaboração própria

Observa-se através do gráfico apresentado na Figura, que em um cenário com taxa de juros de 4 % a.a, 8 % a.a. e 12 % a.a. o investimento levaria aproximadamente 5 anos e cinco meses para ser pago.

Observou-se através do gráfico expresso na Figura que, o investimento inicial de US$ 159.640,00 (Tabela 21), levaria aproximadamente 6 anos para ser pago e, em dez anos, geraria uma receita de aproximadamente US$ 350.000,00 para os 3 cenários.

Na Tabela a seguir, pode-se observar o fluxo de caixa detalhado, conforme apresentado na figura 23, considerando os cenários com as taxas anuais de juros de 4 %, 8 % e 12 % ao ano.

Tabela 25: Projeção do retorno do investimento inicial para os cenários propostos

Anos	4 % a.a. [US$]	8 % a.a. [US$]	12 % a.a. [US$]
0	-159.640,00	-159.640,00	-159.640,00
1	-218.172,68	-218.234,57	-218.296,47
2	-199.326,37	-199.434,69	-199.543,02
3	-154.687,07	-154.836,66	-154.986,27
4	-97.151,26	-97.339,56	-97.527,90
5	-31.877,56	-32.103,03	-32.328,54
6	38.554,74	38.293,13	38.031,45
7	112.671,75	112.374,74	112.077,62
8	189.539,66	189.207,77	188.875,74
9	268.558,10	268.191,75	267.825,23
10	349.307,59	348.907,14	348.506,48

Fonte: Elaboração própria

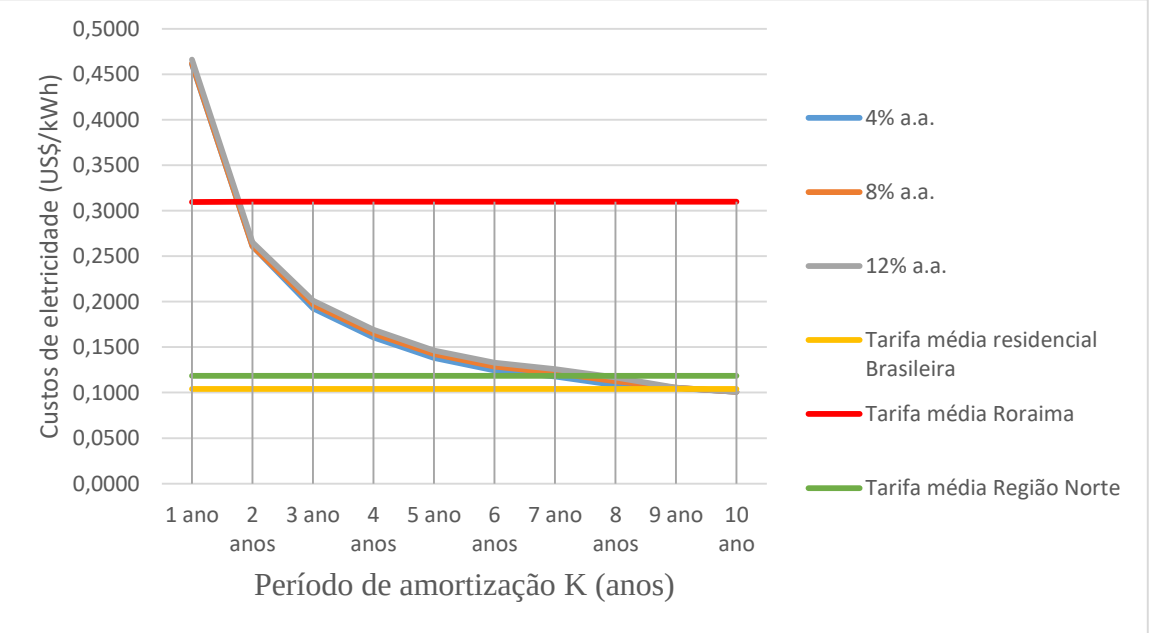
Assim, pode-se observar na Tabela 25 que o resultado da projeção passa a ser maior que zero a partir de seis anos (*payback*), tornando o investimento do projeto viável nesse período. Pode-se observar também que nos dois primeiros anos os custos aumentam em relação ao ano zero, isso ocorre devido ao custo de eletricidade do sistema ser maior

que a tarifa média de Roraima nos dois primeiros anos, conforme apresentado na figura 24. A partir do terceiro ano, quando o custo de eletricidade do sistema proposto fica menor que a tarifa média de Roraima, o sistema começa a gerar uma receita positiva. Desta forma, conforme demonstrado na Tabela 25, ao final de 10 anos, é possível ter uma projeção de lucro de US$ 349.307,59 para o cenário com 4 % a.a., US$ 348.907,14 para o cenário com 8 % a.a. e US$ 348.506,48 para o cenário com 12 % a.a.

7.4.5 Comparação dos resultados com a literatura

Os custos anuais da energia elétrica gerada pelo sistema foram comparados com as tarifas praticadas no Brasil e com a literatura. A partir do gráfico da figura 24, é possível observar a comparação do custo de energia do sistema proposto com as tarifas praticadas no país, atualizadas em 2020.

Figura 24: Custos de energia elétrica do sistema a biogás-gás de síntese e tarifas utilizadas no Brasil



Fonte: Elaboração própria

Pode-se observar a partir do gráfico comparativo, que os custos de energia elétrica do sistema a biogás-gás de síntese permaneceram abaixo da tarifa média brasileira e da

região Norte a partir do décimo ano de amortização. No primeiro ano, é possível observar que os custos de energia do sistema são superiores à tarifa média de Roraima, porém, a partir de dois anos, o custo da energia elétrica permanece abaixo da tarifa praticada em Roraima.

Os valores das tarifas médias utilizadas foram: 0,651 R$/kWh para média da região Norte, 0,572 R$/kWh para média residencial brasileira e 0,199 R$/kWh para média da região de Roraima (ANEEL, 2020). Para fins de comparação no gráfico, os valores foram convertidos para dólar.

A Tabela 26 contém os autores e os valores da literatura utilizados para realizar uma análise comparativa. Não foram encontrados na literatura trabalhos e artigos utilizando a mistura biogás e gás de síntese, alimentando um conjunto motor combustão interna/gerador. Dessa forma, foram selecionados trabalhos referentes à utilização do biogás e do gás de síntese combinados com outros tipos de tecnologias.

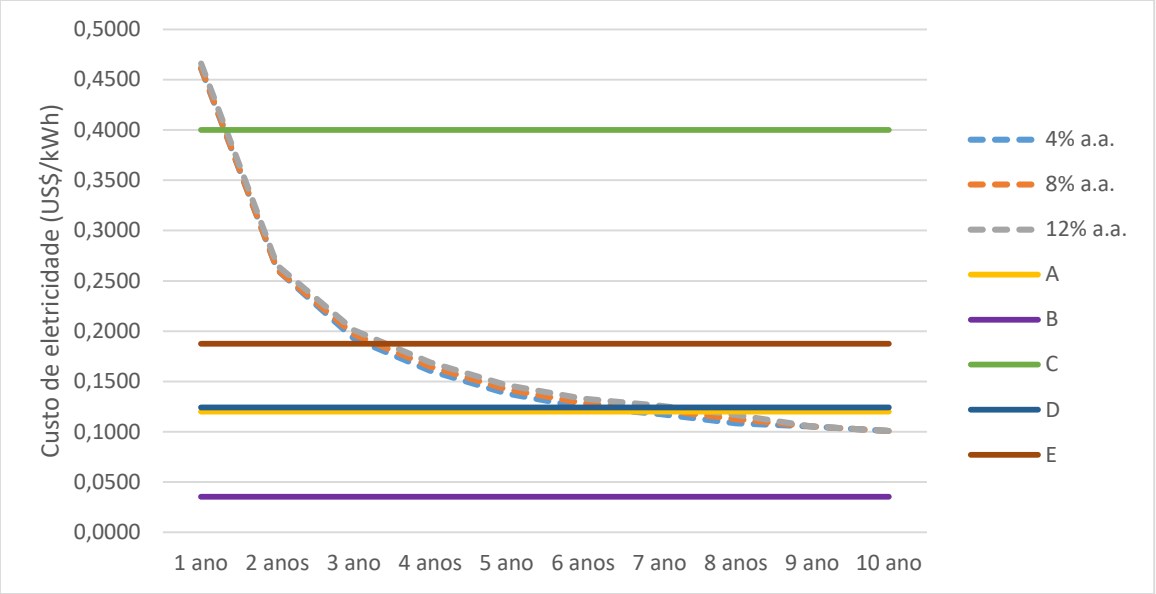
Tabela 26: Custos de energia elétrica encontrados na Literatura

Autor	ID	Sistema	Valor máximo [US$/kWh]	Valor mínimo [US$/kWh]	Média [US$/kWh]
Wu Haifeng	A	Syngas – Solar	0,16	0,08	0,12
Chaves	B	Biogás	0,041	0,03	0,0355
Moura	C	Solar-Eólico-Biogás	1,1	0,3	0,7
H. F. A. F. REIS	D	Vapor - Eletricidade	0,124	0,124	0,124
Júnior Wendling	E	Biogás - Fotovoltaica	0,275	0,1	0,1875

Fonte: Elaboração própria

A Figura 25 apresenta a comparação dos custos de energia do sistema biogás-gás de síntese com os valores da literatura e seus respectivos valores anuais, segundo Tabela 26.

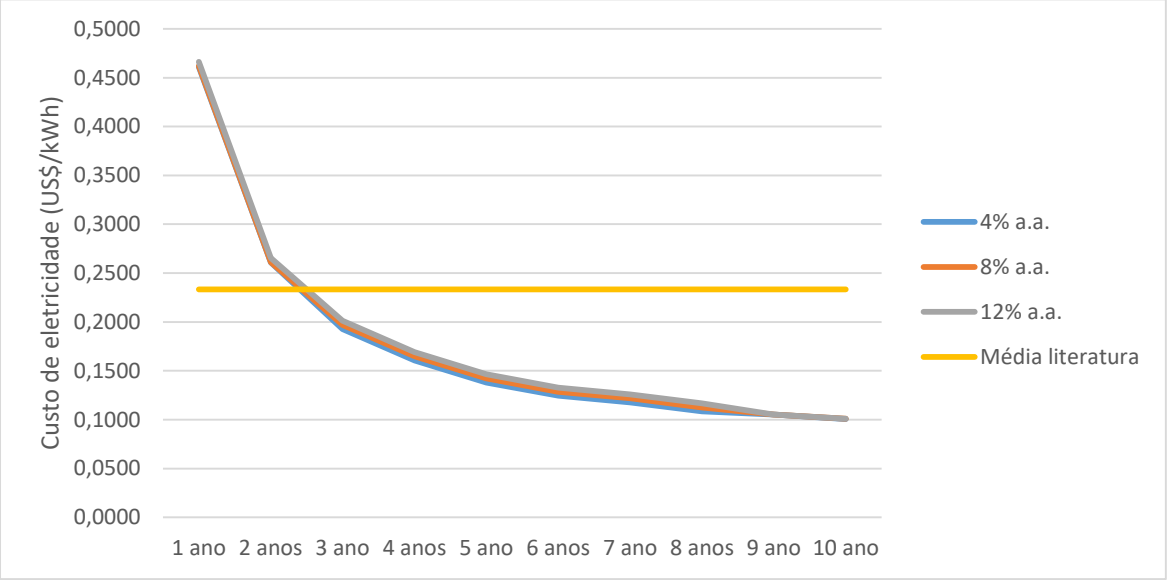
Figura 25: Custos de energia do sistema biogás-gás de síntese e valores da literatura



Fonte: Elaboração própria

A partir da Tabela 26 apresentada, realizou-se uma média dos valores encontrados na literatura. A Figura 26 permite visualizar a comparação realizada entre os custos de energia do sistema biogás-gás de síntese e a média dos valores encontrados na literatura.O gráfico demonstra que o custo de eletricidade do sistema proposto se mantém a baixo de todos os demais a partir do oitavo ano de amortização. Embora os custos se mantenham maiores quando comparados com os custos de um sistema operando apenas com biogás, é importante destacar a importância da utilização de um sistema biogás-gás de síntese, conforme benefícios apresentados na seção 4.3 do presente estudo, sobretudo quando os benefícios são referentes ao aumento no desempenho do motor e na redução das emissões de gases CO e CO_2.

Figura 26: Custos de energia do sistema biogás-gás de síntese e média dos valores da literatura



Fonte: Elaboração própria

A partir dos dados comparativos utilizados é possível observar que os custos da energia elétrica do sistema proposto se mantém inferior à média da literatura a partir do terceiro ano, permanecendo em queda, o que demonstra a viabilidade econômica do sistema proposto, quando comparado com outros estudos presentes na literatura.

8. Considerações Finais

A mistura biogás-gás de síntese em diferentes proporções alimentando um conjunto motor de combustão interna/gerador, para fornecer energia elétrica em uma comunidade isolada mostra, através da análise energética, o potencial de fornecer eletricidade demandada pela população (50kW) em 3 cenários. O cenário 1, considerando a energia suprida pelo biogás em 75 % e do gás de síntese 25 %, se fez necessário um consumo de combustível de 11,02 m³/h para o biogás e 15,62 m³/h para o gás de síntese. O cenário 2, considerando a energia suprida pelo biogás em 50 % e do gás de síntese em 50 % se fez necessário um consumo de 9,27 m³/h para o biogás e 22,23 m³/h para o gás de síntese. Por sua vez, o cenário 3, considerando a energia suprida pelo biogás em 25 % e do gás de síntese em 75 % se fez necessário um consumo de 8,31 m³/h para o biogás e 24,54 m³/h para o gás de síntese. Conhecer o consumo de biogás e syngas necessário é importante para calcular a quantidade de resíduos necessária para atingir o valor requisitado de gás pelo sistema proposto.

Para a energia gerada pelos combustíveis, levando em consideração as proporções adotadas, os resultados encontrados foram 52,8 kW para o cenário 1, 55 kW para o cenário 2 e 54,1 kW para o cenário 3. Verificou-se que o cenário 2, com as proporções iguais para biogás e syngas, gerou a maior quantidade de energia.

Da análise da eficiência global, obteve-se a eficiência de 72,2 % para o cenário 2 avaliado.

Da análise econômica observa-se que para os 3 cenários, considerando taxa anual de juros de 4 % a.a, 8 % a.a, e 12 % a.a, o investimento se torna viável a partir de cinco anos e cinco meses, apresentando ao final de dez anos um fluxo de caixa positivo de US$ 349.307,59 para o cenário 1, US$ 348.907,14 para o cenário 2 e US$ 348.506,48 para o cenário 3.

O custo de produção de eletricidade no sistema biogás-gás de síntese, considerando um período de amortização de 10 anos, se situa entre 0,4611 US$/kWh – 0,1007 US$/kWh para uma taxa de 4 % a.a, 0,4613 US$/kWh – 0,1008 US$/kWh para uma taxa de 8 % a.a e 0,4614 US$/kWh – 0,1009 US$/kWh para uma taxa de 12 % a.a.

Portanto, através dos resultados obtidos, pode-se concluir que com um investimento inicial de US$ 159.640,00 o sistema biogás-gás de síntese proposto é economicamente viável, com um fluxo de caixa positivo a partir do sexto ano de amortização.

A tecnologia proposta composta por um sistema de biodigestão, por um sistema de gaseificação e por um conjunto motor de combustão interna/gerador, por tanto, oferece um amplo potencial de aplicação em comunidades isoladas que apresentem disponibilidade de resíduos biomássicos para produção de biogás e de syngas e assim, suprir com bioeletricidade a demanda por energia elétrica da população. Os resultados apresentados podem ajudar na construção de políticas públicas que contribuam, desse modo, para o uso de fontes de energia limpa e renovável a favor do meio ambiente e da população brasileira.

O panorama nacional e internacional realizado reforçou a importância do estudo da valorização energética dos resíduos da mandioca, não só na produção de biogás, mas também de outros biocombustíveis, como o gás de síntese. O panorama demonstrou também que o Brasil se destaca no cenário referente a utilização de resíduos da mandioca como biomassa, o que reforça a importância de mais estudos focados nesse tema, afim de enriquecer o cenário acadêmico nacional e internacional com novos resultados.

8.1 Limitações da pesquisa

Circunstâncias que não foram consideradas na pesquisa:

- Os custos logísticos de transporte, de armazenamento e de coleta da biomassa não foram considerados;
- Os custos de armazenamento e de distribuição de energia elétrica e/ou térmica não foram considerados;

- Não houve proposta para aproveitamento dos fluxos de saída do sistema, que não sejam energia elétrica, ou seja: gases de exaustão, sólidos, N, S, alcatrão, cinzas e biofertilizante;
- Não foram considerados aspectos técnicos, quanto à quantidade de material particulado, de sólidos e de alcatrão, produzida pelo gaseificador nos cenários propostos;
- Não foi considerado o pagamento de taxas de licenciamento ambiental para a construção do sistema;
- Não foi considerado o pagamento de impostos e de frete de importação de produtos vindo de outro continente;
- Não foi considerado o crescimento populacional e da variação da demanda de energia elétrica da comunidade no decorrer dos 10 anos.

8.2 Sugestões de trabalhos futuros

Com a finalidade de complementar o presente estudo realizado, são sugestões para trabalhos futuros:

- Análise exergética para reaproveitamento dos fluxos de saída do sistema (gases de exaustão, sólidos, N, S, alcatrão e cinzas);
- Análise logística de distância, de transporte e de armazenamento de biomassa;
- Análise dos custos de armazenamento e de distribuição de energia;
- Análise dos aspectos ambientais dos subsistemas e do sistema biogás-gás de síntese;
- Análise do crescimento populacional e da variação da demanda de energia da comunidade no decorrer dos 10 anos;
- Abordar a proposta da pesquisa em outras regiões de Roraima e do país.

- Análise das oportunidades para o aproveitamento dos resíduos de mandioca que não foram utilizados no sistema proposto.

Referências

ABIOGAS. Associação Brasileira do Biogás. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2020/11/NOTA-TECNICA_POTENCIAL_ABIOGAS.pdf. Acesso em 12 de maio de 2021.

AGENDA 2030. Plataforma Agenda 2030. Disponível em: https:// http://www.agenda2030.com.br. Acesso em 20 de novembro de 2020.

ANDERSON, S.; WESLEY, P.; CYRO, A. A. F. Geração de energia elétrica através da gaseificação da biomassa. PPGEL – UFSJ/CEFET-MG, Ilhéus, 2019.

ANEEL. Relatório Ranking das Tarifas. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/relatorio-ranking-tarifas. Acesso em 12 de setembro de 2020.

ALIBABA. Gaseificador de biomassa. Disponível em: https://portuguese.alibaba.com/p-detail/Gaseificador-de-biomassa-gaseificador-downdraft-fog%C3%A3o-gaseificador-de-biomassa-900008112874.html. Acesso em 10 de setembro de 2020.

ALIBABA. Biodigestor biogás Disponível em: https://portuguese.alibaba.com/product-detail/biogas-power-plant-62071027698.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.6cda4245hulDrR&s=p. Acesso em 10 de setembro de 2020.

ALIBABA. Gás mixer. Disponível em: https://portuguese.alibaba.com/product-detail/gas-mixer-gas-mixed-proportion-cabinet-ar-co2-o2-ar-he-co2-ar-he-o2-n2-co2-o2-60795090900.html?spm=a2700.md_pt_PT.deiletai6.2.63023fb8r4UHbt. Acesso em 10 de setembro de 2020.

ALIBABA. Motor Deutz. Disponível em: https://portuguese.alibaba.com/product-detail/50kW-biogas-generators-silent-with-CHP-520143371.html?spm=a2700.8699010.2017203.2.766a56faRzT8PD&s=p. Acesso em 10 de setembro de 2020.

ALIBABA. Purificador. Disponível em: https://portuguese.alibaba.com/product-detail/biogas-purification-equipment-biogas-purifier 62400576302.html?spm=a2700.md_pt_PT.maylikeexp.2.769e1350Noku4a. Acesso em 10 de setembro de 2020.

ANDRÉ, Tiago; ANTONIO, clementino dos. Uso de produtos da cultura da mandioca (*manihot*) na produção animal. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.8, n.15; 2012.

ARAUJO, I. R. C.; SIMONE, D.; TAMIRIS, U.; SHAIANE, D. L.; ANGELO, G. M.; RODRIGO, J. Methane production from cassava starch wastewater in packed-bed reactor and continuous flow. Engenharia Agrícola 38(2): 270–76, 2018.

ARDILA, Yuri. Gaseificação da Biomassa para a Produção de Gás de Síntese e Posterior Fermentação para Bioetanol: Modelagem e Simulação do Processo. Universidade Estadual de Campinas, 2017.

AUTOSSUSTENTAVEL. Disponível em: https://autossustentavel.com/2017/07/biomassa.html#:~:text=Respons%C3%A1vel%20por%20pouco%20mais%20de,e%20capim%20elefante%2C%20por%20exemplo.. Acesso em 12 de maio de 2021.

BARANA, Ana Cláudia. Avaliação de tratamento de manipueira em biodigestores fase acidogênica e metanogênica: 105. 2000.

BERNARDES, M. Proposta de um plano estruturado de ação para atenuação de perdas

não técnicas de distribuição de energia elétrica em uma empresa do Rio Grande do Sul.

2010. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

BLEY, J. C.; LIBÂNIO, J. C.; GALINKIN, M.; OLIVEIRA, M. M. Agroenergia da biomassa residual: Perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais. Foz do Iguaçu/Brasília: Technopolitik Editora, 2009.

BOUGUESSA R.; TARABET LYES, LOUBAR KHALED.; BELMRABET TOUFIK.; TAZEROUT M. Experimental investigation on biogas enrichment with hydrogen for improving the combustion in diesel engine operating under dual fuel mode. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.003.

BOLOY, R.A.M. Simulação computacional de gaseificação de madeira de pequeno porte empregando um gaseificador downdraft. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010.

BRASILAGRO. Com matriz energética mais renovável do mundo, país lidera produção de biocombustíveis. Disponível em: https://www.brasilagro.com.br/conteudo/-com-matriz-energetica-mais-renovavel-do-mundopais-lidera-producao-de-biocombustiveis.html. Acesso em 12 de maio de 2021.

CAVALCANTE, Jose Aparecido.; LORA ,E. E.S.; ANDRADE , R. V.; TEIXEIRA, F.N.; NASCIMENTO, M.A.R..; REZEK , A.J.J.; COBAS.; HWILKE. Avaliação Técnica da Utilização de Gás de Biomassa em Motores Alternativos de Ignição por Centelha. : 8. 2016.

CARDOSO, Carlos Estevão Leite. Restrições à Melhoria da Competitividade da Cadeia Agroindustrial de Fécula de Mandioca.Cruz das Almas, BA: EMBRAPA Mandioca e Fruticultura Tropical, 2004.

CEPEA. Cotação Mandioca. Disponível em: https://www.noticiasagricolas.com.br/cotacoes/mandioca. Acesso em 22 de setembro de 2020.

CEPEA. Agronegócio. Disponível em: 2016.pdf (usp.br). Acesso em 22 de junho de 2019.

CHERNICHARO, C. A. L. Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. PROSAB – Rede Cooperativa de pesquisas. Cap. 5 –Secagem e higienização de lodos com aproveitamento do biogás. p. 122.

CEREDA, M. P. (Coord.). Culturas de tubersosas amiláceas latinoamericanas: propriedades gerais do amido. Campinas: Fundação Cargill, 2001.

CHIARAMONTI, D.; OASMAA, A.; SOLANTAUSTA, Y. Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass. Renewable and sustainable energy reviews (11), p. 1 056-1 086, 2007.

CISCO, L.A.; KOCH, A.H.S.; CONDOTTA, M.P. O Oceano como Fonte de Energia: uma revisão da literatura. ISSN 2447-6102, 2020.

CONTE, J. Nutrition per hectare for staple crops; 2010.

COPA, J. R.; CE, A.T.U.M.; SILVEIRA, J.L.; BOLOY R.A.M.; BRITO, P.; SILVA, V. Techno-Economic Assessment of the Use of Syngas Generated from Biomass to Feed an Internal Combustion Engine. Energies 13(12): 3097, 2020.

COPA, J. R. Avaliação técnico-econômica da incorporação de ciclos combinados associados à gaseificadores de leito fluidizado circulante no setor sucroalcooleiro, UNESP, Guaratinguetá, 2018.

COPEL. Biomassa. Disponível em: Copel. Acesso em 12 de fevereiro de 2019.

CORONADO, C. R.; YOSHIOKA, J. T.; SILVEIRA, J. L. Electricity, hot water and cold water production from biomass. Energetic and economical analysis of the compact system of cogeneration run with woodgas from a small downdraft gasifier. Renew Energy 36(6):1861–1868,2011.

CORONADO, Christian Rodriguez; SILVEIRA Jose Luz; ARAUZO Jesus Perez. Metodologia de dimensionamento, análise energética e seleção de equipamentos de um gaseificador de biomassa para o acionamento de um motor de combustão interna.: 11 2006.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Biomassa para energia. Editora Unicamp, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2008. 29 p.

DE LIMA, José Donizetti; SCHEITT; BOSCHI ,Taciane de Fátima. Propostas de ajuste no cálculo do payback de projetos de investimentos financiados. 9(4): 19., 2013.

DEL BIANCHI, V. Balanço de massa e de energia do processamento de farinha de

Mandioca em uma empresa de médio porte do estado de São Paulo. Botucatu, 1998.

FARIA, Rui alexandre pereira. Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto – estudo de caso.: 76, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA. Anuario Estatıstico de Energia Eletrica 2019 ano base 2018, vol. 1. 2019.

EMBRAPA. Mandioca em números. Disponível em: https://www.embrapa.br/congresso-de-mandioca-2018/mandioca-em-numeros. Acesso em 12 de fevereiro de 2019.

KHAN, Ershad Ullah; BRIJESH, Mainali; ANDREW Martin; SEMIDA, Silveira. Techno-economic analysis of small scale biogas based polygeneration systems: Bangladesh case study. Sustainable Energy Technologies and Assessments 7 (2014) 68–78.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations - Statistics Divion, 2016. Disponível em: http://www.fao.org/faostat. Acesso em 16 de setembro de 2019.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations - Statistics Divion, 2019. Disponível em: http://www.fao.org/faostat. Acesso em 22 de outubro de 2020.

FRARE, laercio Mantovani.; GIMENES, Marcelino Luiz.; PEREIRA, Nehemias Curvelo. Processo para remoção de ácido sulfídrico de biogás. Eng. Sanit. 2009, vol.14, n.2 [cited 2020-11-27], pp.167-172.

FOLHA BV. Noticia Eletrobras. Disponível em: https://folhabv.com.br/noticia/Cansados-da-falta-de-energia--moradores-do-Canta-registram-B-O-contra-Eletrobras/28342. Acesso em 09 de fevereiro de 2019.

PACHECO, F. Energias Renováveis: Breves Conceitos. Conjuntura e Planejamento, Salvador: SEI, 149, p.4-11, Outubro/2006.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. Renewable energy-traditional biomass vs. modern biomass. Energy Policy, v. 32, p. 711-714, abril 2008.

HAGOS, Ftwi Yohaness.; RASHID, A. A.; SHAHARIN, Anwar Sulaiman. Trends of Syngas as a Fuel in Internal Combustion Engines. Advances in Mechanical Engineering 6: 401587, 2014.

HALEWADIMATH, S.S.; V.S. YALIWAL.; N.R. BANAPURMATH.; E A.M. SAJJAN. Influence of Hydrogen Enriched Producer Gas (HPG) on the Combustion Characteristics of a CRDI Diesel Engine Operated on Dual-Fuel Mode Using Renewable and Sustainable Fuels. Fuel 270: 117575. (2020).

HAIFENG, W. U.; QIBIN, Liub.; ZHANG, B. A. I.; GENGXIN, X. I. E.; JIE, Zheng.; BOSHENG, S.U. Thermodynamics analysis of a novel steam/air biomass gasification combined cooling, heating and power system with solar energy. Applied Thermal Engineering 164 (2020) 114494.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/roraima. Acesso em 02/05/2021.

IEMA. Instituto de Energia e Meio Ambiente. Disponível em: http://energiaeambiente.org.br/produto/quem-ainda-esta-sem-acesso-a-energia-eletrica-

no-brasil. Acesso em 15 de dezembro de 2020.

JAYAH, T. H.; AYE, L.; Fuller, R; Stewart, D.F. Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. Biomass and Bioenergy, vol. 25, pp. 459-469, 2003.

KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. Energie aus biomasse:grundlagen, techniken und verfahren. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2001.

KONG, X.Q.; WANG, R.Z.; HUANG, X.H. Energy efficiency and economic

FEASIBILITY OF CCHP DRIVEN BY STIRLING ENGINE. Energy Conversion and Management,vol 45, pp. 1433–1442, 2004.

KUCZMAN, Osvaldo.; GOMES ,Simone D.; MARIA, H. F. Tavares.; TORRES, G. B.; MICHAEL S, Alcântara. Produção específica de biogás a partir de manipueira em reator de fase única. Engenharia Agrícola 31(1): 143–49 (2011).

LAMAS, Wendell de queiroz; SILVEIRA, Jose luz; GIORGIO, eugenio oscare giacaglia. Thermoeconomic Analysis Applied to an Alternative Wastewater Treatment. Renewable Energy 35(10): 2288–96 (2010).

LAMAS, Wendell de queiroz. Análise termoeconômica de uma mini-estação de tratamento de esgoto com auto-suficiência energética. : 135 (2007).

LARANCI, P.; SILVEIRA, J. L.; LAMAS, W. D. Q. Solar 1.1 software: a case study of a chicken farm illumination project. Exacta, [s.l.], v. 10, n. 1, 2012.

LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010 . Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em 25 de setembro de 2020.

LIMA, J.D.; SCHEITT, L.C.; BOSCHI, T. DE F.; SILVA, N.J. DA, MEIRA, A.A. DE, DIAS, G.H. Propostas de ajuste no cálculo do payback de projetos de investimentos financiados. ISSN 1808-2882, 2013.

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, 2012.

LINS, L.P.; MITO, J.Y.L.; FERNANDES, D. M. Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa. IV SIGER, 2015.

LUO G, ANGELIDAKI I. Integrated biogas upgrading and hydrogen utilization in an anaerobic reactor containing enriched hydrogenotrophic methanogenic culture. Biotechnol Bioeng. 2012 Nov;109(11):2729-36. doi: 10.1002/bit.24557. Epub 2012 May 28. PMID: 22615033.

LORA, Electo eduardo silva; ANDRADE, Rubenildo vieira; ROCHA, Matheus Henrique; CORAL, Doris del socoroo. Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis". : 88.

LORA E. E. S.; NOGUEIRA L. A. H. Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações.

2th Edition. Rio de Janeiro, 2003.

MADEIRA, J.G.F.; DELGADO, A.R.S.; BOLOY, R.A.M.; COUTINHO, E.R.; LOURES, C. C. A. Avaliação exergética e econômica da incorporação da produção de hidrogênio em uma estação de tratamento de efluentes de mandioca. Appl Therm Eng, 123: 1072-1078, 2017.

MARTINEZ, Daiana Gotardo; FEIDEN, Armin. Potencial do resíduo do processamento da mandioca para produção de etanol de segunda geração. Revista Brasileira de Energias Renováveis, 2017.

MAZZAROTTO, V.; VALLES, A.; DA ROCHA, V. Evaluación de las emisiones de monóxido de carbono en un caldero de llama tubular utilizando gas natural. RESMA, ISSN: 2447-8822, 2019.

MÉIER, D.; FAIX, O. State of the art of applied fast pyrolysis of lignocellulosic materials a review. Bioresource Technology (68), p. 71-77, 1999.

MILANEZ, Artur Yabe; GUIMARÃES, Diego Duque. Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. : 56 (2020).

MME. Ministerio de Minas e Energia. Disponível em: http://www.mme.gov.br/web/guest/todas-as-noticias/-/asset_publisher/pdAS9IcdBICN/content/ministro-participa-do-leilao-para-o-atendimento-ao-estado-de-roraima/pop_up?_101_INSTANCE_pdAS9IcdBICN_viewMode=print&_101_INSTANCE_pdAS9IcdBICN_languageId=pt_BR. Acesso em 19 de novembro de 2020.

MME. Ministerio de Minas e Energia. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/ministerio-de-minas-e-energia-reitera-seu-apoio-integral-a-politica-nacional-de-biocombustiveis-renovabio#:~:text=A%20sociedade%20brasileira%2C%20atrav%C3%A9s%20do,no%20%C3%A2mbito%20do%20Acordo%20de. Acesso em 19 de abril de 2021.

MOURA, Carlos Henrique Silva. Sistema híbrido solar-eólico-biogás incluindo produção, armazenamento e uso dinâmico de hidrogênio". : 85 (2020).

NADAUD, Gabriela C.A. Acesso a energia elétrica de populações urbanas de baixa renda: o caso das favelas do Rio de Janeiro. 160 folhas. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2012.

NARNAWARE.; SUNIL L, NSL SRIVASTAVA.; E SAMIR VAHORA. Gasification: An Alternative Solution for Energy Recovery and Utilization of Vegetable Market Waste. Waste Management & Research 35(3): 276–84 (2017).

OKAMURA, Layssa Aline; GIANCARLO Tomazzoni; EVANDRO, José Lopes; E Pedro ramos da costa neto. Obtenção sustentável de gás de síntese: prospecção das tecnologias disponíveis baseada em patentes e artigos. Cadernos de Prospecção 6(1): 27–35 (2013).

DE OLIVEIRA CHAVES, Y.A.; VAL SPRINGER, M.; BOLOY, R.A.M. Performance Study of a Microturbine System for Cogeneration Application Using Biogas from Manipueira. Bioenerg. Res. 13, 659–667 (2020).

GOMEZ-MONTOYA, JUAN-PABLO; CACUA-MADERO, KAREN-PAOLA; IRAL-GALEANO, LAYRISSER AND AMELL-ARRIETA, ANDRÉS-ADOLFO. Effect of biogas enriched with hydrogen on the operation and performance ofadiesel-biogas dualengine. c.t.f cienc. tecnol. futuro [online]. 2013, vol.5, n.2 [cited 2020-11-26], pp.61-71.

MUNASINGHE, P. C.; KHANAL, S. K.; PANDEY, A.; LARROCHE, C.; RICKE, S. C.; DUSSAP, C.-G.GNANSOUNOU, E.; Chapter 4 - Biomass-derived Syngas Fermentation into Biofuels, in Biofuels. 2011, Academic Press: Amsterdam. p. 79-98.

PNRS. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em 19 de abril de 2020.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. 277 p.

QIAN, Yong; SUN SHUZHOU; JU, DEHAO; SHAN, XINXING; LU, XINGCAI. Review of the State-of-the-Art of Biogas Combustion Mechanisms and Applications in Internal Combustion Engines. Renewable and Sustainable Energy Reviews 69: 50–58 (2017).

RASOTO, A.; GNOATTO, A.A.; OLIVEIRA, A.G. de; ROSA, C.F. da; ISHIKAWA, G.; CARVALHO, H.A. de; LIMA, I.A. de; LIMA, J.D. de; TRENTIN; M.G.; RASOTO, V.I.Gestão Financeira: enfoque em inovação. 1. ed. Curitiba: Aymará, 2012. v. 6. 140p. (série UTFinova).

DENTELLO, R. O. Estudo de geração de energia elétrica em motores stirling acionados por biogás e/ou energia solar. UNESP, Guaratinguetá, 2017.

REIS, Heytor fabricio arantes .;PEREZ, E ronaldo. Análise termoeconômica de cogeração com resíduos da palma". The Journal of Engineering and Exact Sciences 3(7): 0975–85. (2017).

REIS, A.S. Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 2012.

RIBEIRO, R. S.; LIMA , E. R. D. C. Gaseificação de Biomassa na Geração de Eletricidade em Pequena Escala. : 10.

ROCHA, José dílcio; SCHULTZ, Emerson.Plataforma Tecnológica Termoquímica (Pirólise e Gaseificação). : 5.

RORAIMA ENERGIA. Quadro de Tarifas Energética 2020 ano base 2019, vol. 1. 2020. Disponível em: www.roraimaenergia.com.br/wp-content/uploads/2020/04/Tarifas-dos-Anos-de-2019-e-2020.zip . Acesso em 10 de setembro de 2020.

SANCHES, C. G. Tecnologia da gaseificação. UNICAMP, departamento de engenharia

térmica e fluidos, 2010.

SALMAN, ABDU AHMED; SONG, ZHOU; SOLOMON, TSEGAY; NASEEM, AHMAD; YUANQING, ZHU .Effects of hydrogen-enriched biogas on combustion and emission of a dual-fuel diesel engine, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, DOI: 10.1080/15567036.2020.1736694., 2020.

SCHENK, P.; THOMAS-HALL, S.; STEPHENS, E.; MARX, U.; MUSSGNUG, J.; POSTEN, C.; KRUSE, O.; HANKAMER, B. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. Bioenergy Research, v. 1, n. 1, p. 20–43, 2008.

SCHNÜRER, A.; JARVIS, A. Microbiological Handbook for Biogas Plants Swedish

WASTE MANAGEMENT U2009:03 Swedish Gas Centre Report 207, Suécia, Abril 2009.

SILVEIRA, José luz; CARVALHO, João Andrade de ; IRAÍDES, Aparecida de castro villela. Combined Cycle versus One Thousand Diesel Power Plants: Pollutant Emissions, Ecological Efficiency and Economic Analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews 11(3): 524–35 (2007).

SOLARTE-TORO, JUAN CAMILO; YESSICA CHACÓN-PÉREZ; CARLOS ARIEL CARDONA-ALZATE. Evaluation of Biogas and Syngas as Energy Vectors for Heat and Power Generation Using Lignocellulosic Biomass as Raw Material. Electronic Journal of Biotechnology 33: 52–62 (2018).

SOUZA, S. N. M.; PEREIRA,W. C.; NOGUEIRA, C. E. C.; PAVAN, A. A.; SORDI, A. Custo da Eletricidade Gerada em Conjunto Motor Gerador Utilizando Biogás da Suinocultura. Acta Scientiarum, Maringá – PR, v. 26, n. 2, p. 127-133, 2004.

SUZUKI, A. B. P.; FERNANDES, D. M.; FARIA, R. A. P.; VIDAL, T. C. M. Uso de biogás em motores de combustão interna. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias,* vol. 4, nº 1, pp. 221-237, 2011.

TORRES, Pedro Jessid. Avaliação Técnico-Econômica de Diferentes Tecnologias de Geração de Eletricidade Para o Aproveitamento Energético de Resíduos de Biomassa em Comunidades Isoladas. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, Itajubá, 2017.

VALLE, A. E.; BATISTA, M. R.; TUNA, C. E.; VOROBIEFF, C. L.; E SILVEIRA, J.

L. An alisis Energetico , Exergetico y Ecologico Aplicado en un Motor de Combustion Interna de Pequeno Porte Accionado con Biogas. the Xi Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission - Clagtee 2015, November (2015).

VARELLA, A. C. Princípios de funcionamento dos motores de combustão interna. UFRRJ, IT – Departamento de Engenharia.

WANG M, BALDWIN S; LAU A. Development of a calculator for the technoeconomic

assessment of anaerobic digestion systems, Chemical and Biological. Engineering University of British Columbia Vancouver, BC; 2009.

WARNECKE, R. Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier, Biomass and Bioenergy, vol. 18, p. 489-497, 2000.

WENDER, I. Reactions of synthesis gas. Fuel Processing Technology, vol. 48, p. 189-297, 1996.

WYMAN, I. Renewable Energy, Sources for fuels and ekectricity, Island Press, Washington D. C, vol. 48, p. 189-297, 1992.

WIKIPEDIA. Municipio de Cantá. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Cant%C3%A1. Acesso em 12 de fevereiro de 2019.

ZULDIAN, Prima; SUNEERAT, Fukuda; M. Djoni bustan. Economic Analysis of Coal Gasification Plant for Electricity and Thermal Energy Supplies in Indonesia. Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 5, No. 3, Maio 2017.

MEI WU, L.; HUI ZHOU, C.; SHEN TONG, D.; HUA YU, W. Chapter 15 - Catalytic Thermochemical Processes for Biomass Conversion to Biofuels and Chemicals, in Bioenergy Research: Advances and Applications, V.K. Gupta, M.G.T.P. Kubicek, and J.S. Xu, Editors. 2014, Elsevier: Amsterdam. p. 243-254.

XAVIER, Beatriz helene. Aspectos termodinâmicos, ecológicos e econômicos de sistemas de cogeração com motores de combustão interna operando com gás natural, biogás e gás de síntese. : 117 (2016).