CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

GERAÇÃO DE ELETRICIDADE EM SISTEMA HÍBRIDO BIOGÁS-SOLAR FOTOVOLTAICO: ASPECTOS TECNOECONÔMICOS

João Victor Batista Travessa

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(a): Ronney Arismel Mancebo Boloy

Rio de Janeiro
Julho/2019

GERAÇÃO DE ELETRICIDADE EM SISTEMA HÍBRIDO BIOGÁS-SOLAR FOTOVOLTAICO: ASPECTOS TECNOECONÔMICOS

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.

João Victor Batista Travessa

Banca Examinadora:

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

Professora Dra. Cristina Gomes de Souza (CEFET/RJ, Brasil)

Professora Dra. Gisele Maria Ribeiro Vieira (CEFET/RJ, Brasil)

Professor Dr. Wendell de Queiróz Lamas (USP, Brasil)

Rio de Janeiro
Julho/2019

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

T781 Travessa, João Victor Batista
Geração de eletricidade em sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico : aspectos tecnoeconômicos / João Victor Batista Travessa.—2019.
102f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2019.
Bibliografia : f. 96-102
Orientador : Ronney Arismel Mancebo Boloy

1. Engenharia de produção. 2. Sistema de energia fotovoltaica. 3. Biogás. 4. Energia elétrica - Aspectos econômicos. I. Boloy, Ronney Arismel Mancebo (Orient.). II. Título.

CDD 658.5

Elaborada pela bibliotecária Mariana Oliveira CRB-7/5929

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, que nos conduz no dia-a-dia por caminhos sinuosos, que nem sempre entendemos no momento, mas com certeza são sempre os melhores e os necessários para nossas vidas.

Ao Nuno, por ter me incentivado e apoiado desde antes da inscrição do processo seletivo do Mestrado, no dia da prova de seleção com conjuntivite e durante todos os incansáveis e intermináveis dias de estudo. Sem ele, este sonho nunca teria se tornado realidade.

À minha mãe, Selma, por ter me ensinado o gosto pelo estudo e ser meu exemplo de dedicação.

Ao meu padrinho, tio Batista, que auxiliou na minha formação, foi, e sempre será, meu exemplo de força.

As minhas tias, Helenice e Vânia, e a minha vó, Serafina, por terem me auxiliado sempre proporcionando meus estudos e por terem ajudado a minha mãe a me criar.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ronney, que sempre me incentivou a dar o meu melhor neste trabalho, e cuja dedicação ao ensino inspira seus alunos.

À comunidade do CEFET/RJ, que tão bem me recebeu e proporcionou meus estudos.

Ao grupo de pesquisa GEEMAT CEFET/RJ, que sempre contribuiu na troca de conhecimentos e no meu aprendizado.

À toda minha família e amigos, por entenderem alguns momentos de ausência ouvindo sempre a mesma frase: “tenho que estudar”.

Meu mais sincero e profundo muito obrigado.

RESUMO

Geração de Eletricidade em Sistema Híbrido Biogás-Solar Fotovoltaico: Aspectos Tecnoeconômicos

A partir da mudança de percepção do papel do ser humano frente as mudanças climáticas e o crescimento populacional das últimas décadas, a busca por novas tecnologias para geração de energia economicamente competitiva com as fontes fósseis é uma preocupação da nova era. A produção de biogás a partir de Resíduos Sólidos Municipais (RSU) é uma solução para duas questões atuais: a destinação dos resíduos urbanos e a geração de energia renovável. O presente estudo propõe a modelagem, simulação e avaliação do potencial de geração de energia elétrica e cálculo da eficiência energética no sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico teórico. Este sistema é composto por um biodigestor Kompogas, que receberá os RSU do Aterro Municipal de Guarapuava, no estado do Paraná, acoplado a um conjunto motor de combustão interna (MCI) Caterpillar CG260-12 (50Hz) e 36.123 painéis solares fotovoltaicos de Silício monocristalino. Como resultado, foi comprovada a possibilidade de geração de 7.851,82 kW de energia híbrida no ano, sendo 2.797,42 kW (35,6%) provenientes da queima do biogás, e 5.054,40 kW (64,4%) provenientes dos painéis fotovoltaicos. Nesta proposta, foi obtida uma eficiência energética de 17,21%, dentro do valor esperado, uma vez que, no subsistema alimentado a biogás, os gases de exaustão da combustão são desperdiçados. Através da análise econômica isolada dos subsistemas, verifica-se que em períodos de amortização menores, o custo da energia produzida pelo subsistema FV é significativamente maior que o do a biogás, e conforme se aumenta o período de amortização, o custo deste subsistema apresenta reduções maiores que no subsistema a biogás, tornando o sistema mais igualitário em sua composição de custos, aproximando-os da isonomia de custos. Isso ocorre pois, apesar do investimento inicial do sistema solar ser maior, ele possui custos de operação e manutenção menores. A análise econômica da eletricidade produzida pelo sistema híbrido proposto variou entre 0,0869 US$/kWh e 0,1385 US$/kWh, estando esses valores coerentes com os encontrados na literatura.

Palavras-chave: Energia; Sistema híbrido; solar fotovoltaico; biogás.

ABSTRACT

Generation of Electricity in Hybrid System Biogas-Solar Photovoltaic: Technoeconomic Aspects

From the shift in the perception of the role of human beings in the face of climate change and population growth in recent decades, the quest for new technologies to production of energy economically competitive with fossil sources is a concern of the new era. The production of biogas from Municipal Solid Waste (MSW) is a solution to two current issues: the destination of urban waste and the generation of renewable energy. The present study proposes the modeling, simulation and evaluation of the potential of electric energy generation and calculation of the energy efficiency in the theoretical biogas-solar photovoltaic hybrid system. This system is composed of a biodigester Kompogas, which will receive the MSW from the Guarapuava Municipal Landfill in the state of Paraná, with an internal combustion engine (ICE) Caterpillar CG260-12 (50Hz) and 36 monocrystalline Silicon photovoltaic panels. As a result, the possibility of generating 7,851.82 kW hybrid energy in the year was proved, being 2,797.42 kW (35.6%) from biogas, and 5,054.40 kW (64.4%) from the photovoltaic panels. In this proposal, the energy efficiency of 17.21 % was obtained, within the expected value, since the combustion exhaust gases are wasted in the biogas fed subsystem. Through the economic analysis of the subsystems, it was verified that in lower amortization periods, the cost of energy produced by the PV subsystem is significantly higher than that of biogas, and at higher amortization periods, the cost of this subsystem is reduced larger than in the biogas subsystem, making the system more egalitarian in its cost composition, bringing them almost to the same cost. This is because, although the higher initial investment of the solar system, it has lower operating and maintenance costs if compared with biogas system. The economic analysis of the electricity produced by the proposed hybrid system ranged from 0.0869 US$ / kWh to 0.1385 US$ / kWh, being these values consistent with those found in the literature.

Keywords: Energy; Hybrid system; solar photovoltaic; biogas.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 - Geração total de RSU no Brasil (t/dia) 18
Figura 1 – Etapas da Digestão anaeróbia 20
Figura 2 - Motor de combustão interna 29
Figura 3 - Gerador a gás 31
Figura 4 – Esquema representativo dos solstícios e equinócios 32
Figura 5 – Ângulos notáveis em solarimetria 33
Figura 6 – Processos simplificados de decomposição da radiação solar na atmosfera 33
Figura 7 - Componentes da radiação solar em um plano inclinado 35
Figura 8 - Comparação da insolação real vs. HSP 38
Figura 9 – Metodologia 44
Figura 10 - Relação entre VPL e taxa de desconto (i) 51
Figura 11 – Município de Guarapuava/PR 57
Gráfico 2 - Consumo per capita de energia elétrica no estado do Paraná (kWh/hab) 58
Figura 12 –Aterro Municipal de Guarapuava/PR 60
Figura 13 – Fluxo do processo: sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico 61
Figura 14 – Separação dos volumes de controle no Processo 63
Figura 15 – Volume de Controle 1: Coleta Seletiva 64
Figura 16 - Volume de Controle 2: Pré-Tratamento 65
Figura 17 - Volume de Controle 3: Biodigestão 66
Figura 18 - Volume de Controle 4: Limpeza 67
Figura 19 - Volume de Controle 5: Motor-gerador 70
Figura 20 - Volume de Controle 6: Conjunto de painéis fotovoltaicos 71
Gráfico 3 - Média mensal da irradiação solar no plano inclinado (Wh/m²) 71
Figura 21 - Seleção dos processos para cálculo da eficiência energética 73
Figura 22 - Planta Biogás & FV 74
Figura 23 – Fluxos de custo para produção de Biogás 76
Gráfico 4 - Custo da eletricidade produzida no CMG (US$/kWh) 81
Gráfico 5 - Custo da eletricidade produzida nos painéis FV (US$/kWh) 83
Gráfico 6 - Custo da eletricidade produzida nos subsistemas (US$/kWh) 84
Gráfico 7 - Custo da eletricidade no sistema híbrido (US$/kWh) 85
Gráfico 8 – Receita da eletricidade nos subsistemas (MM US$) 85
Gráfico 9 – Receita da eletricidade no sistema híbrido (MM US$) 86

Figura 24 - Processo de geração de energia elétrica híbrida 88
Gráfico 10 - Comparação entre potência elétrica híbrida gerada x demanda da comunidade 89
Gráfico 11 – Comparação do custo anual com a literatura (US$/kWh) 92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparações entre as tecnologias de produção de Biogás 21
Tabela 2 – Composição básica do Biogás por origem 25
Tabela 3 – Variação do PCI em relação à composição do biogás 26
Tabela 4 – Poder Calorífico Inferior de outros combustíveis 26
Tabela 5 – Impactos das impurezas no biogás 27
Tabela 6 – Comparação de tecnologias para geração de eletricidade a partir de biogás 28
Tabela 7 – Parâmetros de diferentes modelos de painéis FV 37
Tabela 8 – Dez publicações mais recentes com a temática “biogas”, “solar” e “photovoltaic” na base Web of Science 40
Tabela 9 – Cinco publicações mais recentes com correlação temática 42
Tabela 10 - Percentuais de excesso de ar na combustão 47
Tabela 11 – Composição em volume e massa do ar 47
Tabela 12 – Indicadores Econômicos mais comuns para análise de investimento em energia 50
Tabela 13 – Custo de instalação MCI x Capacidade 53
Tabela 14 – Percentual de produção de energia a partir do biogás e de painéis FV em sistemas híbridos 59
Tabela 15 – Composição do RSU de Guarapuava 60
Tabela 16– Fluxo mássico do RSU de Guarapuava 61
Tabela 17 – Composição dos recicláveis de Guarapuava 64
Tabela 18 – Percentual de composição dos gases da combustão 69
Tabela 19 – Especificações do CMG CG260-12 (50Hz) operando com biogás 69
Tabela 20 – Especificações do painel FV 72
Tabela 21 – Resumo dos processos de produção de biogás 77
Tabela 22 – Apresentação dos custos por fluxo 78
Tabela 21 – Custo da energia elétrica produzida pelo subsistema a biogás (US$/kWh) 80
Tabela 22 – Custo da energia elétrica produzida pelo subsistema FV (US$/kWh) 82
Tabela 23 – Análise do fluxo de massa ponto a ponto do processo 87
Tabela 24 – Custos máximos e mínimos dos subsistemas (US$/kWh) 90
Tabela 25 – Custos máximos e mínimos do sistema híbrido (US$/kWh) 90
Tabela 26 – Indicadores econômicos do sistema híbrido 91

Tabela 27 – Comparação de custos da energia híbrida com a literatura 92

SUMÁRIO

Introdução **13**

1 Revisão Bibliográfica **18**

1.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) 18

1.2 Geração de Biogás a partir de RSU 19

1.3 Características do Biogás 25

1.4 Geração de bioenergia a partir do Biogás 27

1.5 Energia Solar Fotovoltaica 31

1.6 Sistemas Híbridos 38

1.7 Pesquisas recentes 39

2 Metodologia, materiais, limitações da pesquisa e métodos **44**

2.1 Metodologia e Materiais 44

2.2 Limitações da Pesquisa 45

2.3 Métodos 46

2.3.1 Conjunto Motor-gerador (CMG) 46

2.3.2 Análise Energética 48

2.3.3 Análise Econômica 49

2.3.4 Demanda energética de uma comunidade 55

3 Resultados e Discussões **57**

3.1 Guarapuava/PR 57

3.2 Modelagem do sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico 61

3.3 Resultados da Análise Energética 62

3.3.1 Volume de Controle 1: Coleta Seletiva 63

3.3.2 Volume de Controle 2: Pré-Tratamento 65

3.3.3 Volume de Controle 3: Biodigestão 66

3.3.4 Volume de Controle 4: Limpeza 67

3.3.5 Volume de Controle 5: Conjunto Motor-gerador 68

3.3.6 Volume de Controle 6: Conjunto de painéis fotovoltaicos 70

3.3.7 Eficiência Energética 72

3.4 Resultados da Análise Econômica 74

3.4.1 Premissas da análise 74

3.4.2 Fluxos de Custo 75

3.4.3 Análise do subsistema CMG 78

3.4.4 Análise do subsistema de painéis solares FV 81

3.4.5 Análise do sistema híbrido 83

3.5 Discussões 87
Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros 94
Referências 96

Introdução

A ABNT define os resíduos sólidos como aqueles que “[...] resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição”, além de “ [...] os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”, (ABNT, Resíduos sólidos – Classificação ABNT NBR 10004:2004, 2004).

O rápido crescimento populacional vem pressionando o uso da terra e gerando diversos desafios para a gestão da infraestrutura das cidades, sejam eles sociais, ambientais ou econômicos. Dentre eles, está o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Em 1900, 13 % da população mundial vivia em centros urbanos e produziam cerca de 110 milhões de toneladas de RSU por ano. Já no ano 2000, 49 % da população mundial vivia em centros urbanos, produzindo cerca de 1,1 bilhão de toneladas de RSU, um crescimento de 100 vezes. As previsões apontam ainda que em 2025, a produção total de RSU será o dobro do ano 2000, ou seja, o crescimento da geração de resíduos segue um crescimento exponencial [1].

Além da quantidade, a composição do lixo urbano vem mudando: antes da industrialização, o lixo gerado pela sociedade era composto principalmente por matéria orgânica, mais fácil de ser eliminado por meio de técnicas de compostagem ou mesmo soterramento. Após a industrialização, os produtos consumidos passaram a ter outros componentes, como vidro, plástico e produtos químicos variados. Essa geração de resíduos está relacionada ao modelo econômico o qual muitos países se inserem: com o estímulo ao consumo, cada vez mais as pessoas adquirem bens das mais variadas composições e origens do mundo. Possuindo um tempo de decomposição maior, esses componentes misturados ao lixo passaram a se tornar um passivo para as comunidades.

Com o aumento da quantidade de lixo gerado, áreas foram separadas para que esses resíduos fossem acondicionados, mas sem a devida infraestrutura e sem planejamento. Nesse momento, surgiram os “lixões”: áreas em que os resíduos eram descartados a céu aberto. A decomposição do lixo nessas áreas gera grande impacto ambiental, a partir da penetração dos contaminantes no solo até chegar nos lençóis

freáticos, além da atração de vetores endêmicos como ratos e urubus.

O crescimento populacional gera impactos não apenas ambientais, mas também sociais. O crescimento econômico das cidades faz com que mais pessoas emerjam da pobreza, assim como aumenta o consumo energético dos mais ricos e a demanda por serviços energéticos. Esse crescimento na demanda por energia propicia um ambiente favorável para o desenvolvimento e a difusão de novas tecnologias, pois gera o aumento de preços em um primeiro momento, o que proporciona margem para a entrada de novos concorrentes que, na competição em um livre mercado equilibrado, acaba por reduzir o preço da energia a longo prazo.

No entanto, a geração e a transformação de energia em eletricidade, por vezes, é degradante ao meio ambiente. Por pressões econômicas e busca pelo menor custo, nem sempre a tecnologia menos poluente é a utilizada. Reconhecendo seu papel como parte das causas da mudança climática na Terra, diversos países adotaram políticas para estimular a redução das emissões atmosféricas e, gradualmente, migrarem para uma matriz energética mais renovável.

Energias renováveis são aquelas que são advindas de fontes que se reabastecem naturalmente, como o vento, o Sol e as marés, por exemplo. Nem todo recurso natural é renovável, como por exemplo o petróleo e o urânio, que embora encontrados na natureza, não são reabastecidos no tempo de vida do homem.

Um dos problemas da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis é a intermitência da disponibilidade do recurso, como no caso da noite para um sistema solar, a ausência de vento para um sistema eólico ou mesmo a falta de ondas para um sistema maremotriz. Nesse contexto, a geração de energia elétrica a partir de biomassa se destaca dentre as outras fontes renováveis, uma vez que ela pode ser armazenada para a geração de energia de maneira contínua.

A biomassa é a matéria orgânica, de origem vegetal ou animal, que pode ser utilizada para a geração de energia. Essa geração pode ser por meio da queima direta, ou a partir de sua transformação em biogás para posterior queima. A vantagem da transformação da biomassa em biogás é o aumento do potencial energético do recurso, fornecendo assim, mais energia.

Nesse contexto, o aproveitamento energético dos RSU é uma opção atraente para a gestão dos resíduos urbanos, vez que aumenta a diversificação da matriz energética, fornecendo maior segurança energética ao desenvolvimento econômico local, além de auxiliar na destinação adequada a um grande passivo das cidades: o lixo urbano.

Para aumentar a capacidade de geração de energia, faz-se uso de mais de uma fonte geradora na configuração de sistemas híbridos. Sistemas a partir de mais de uma fonte renovável são conhecidos como sistemas híbridos renováveis e são comumente utilizados para o fornecimento de energia para comunidades isoladas do sistema interligado. Entretanto, se utilizados ligados à rede convencional, podem reduzir o custo da energia consumida, a partir de ganhos de otimização na geração e da redução dos preços das tecnologias ao longo do tempo.

A vantagem da utilização de sistemas híbridos é a combinação de duas tecnologias de modo a se obter ganhos mais elevados do que com a utilização sozinha de uma ou outra fonte, como por exemplo, a por meio do aumento da eficiência e aumento da confiabilidade da disponibilidade energética.

No Brasil, a principal fonte de geração de energia elétrica é a hidroelétrica que, embora renovável, possui caráter intermitente de geração, dependendo dos regimes de chuvas, além de ser alvo de questionamentos pelos impactos ambientais causados por seus reservatórios. É um desafio atual da sociedade a busca por fontes de geração de energia elétrica capazes de suprir a demanda necessária para assegurar o crescimento econômico dos países, sem causar impactos ambientais significativos.

O Brasil possui alta irradiação solar, o que confere a ele grande potencial de geração de energia elétrica solar. A utilização de painéis solares fotovoltaicos é uma opção para a geração de energia como fonte complementar, aproximando a geração do consumo, reduzindo assim, as perdas na transmissão [3].

Cerca de 90% do mercado mundial de insumos para a geração solar fotovoltaica é de silício cristalino [4]. O Brasil é um grande produtor de silício de grau metalúrgico, estando esse material na rota tecnológica para a produção de módulos fotovoltaicos. Embora esse segmento ainda não esteja consolidado no Brasil, há um grande potencial de crescimento nas próximas décadas [5].

Sistemas solares são menos poluentes se comparados às fontes convencionais de energia, além de requererem pouca ou nenhuma manutenção, assim como são simples de serem manuseados [6]. Nos últimos anos, observou-se um aumento no número de instalações fotovoltaicas no mundo, ancorada por uma estratégia de renovação da matriz energética dos países para fontes mais limpas [5]. No entanto, devido ao seu caráter intermitente de geração, é necessária a geração em conjunto com outra fonte de energia, capaz de suprir a demanda energética nos momentos em que não há irradiação solar. Um sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico permite a geração contínua de energia elétrica.

A proposta de interligação do sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico ao sistema elétrico nacional permite o estudo dessas tecnologias com a visão de transição da matriz energética nacional com maior participação de energias renováveis, vez que parte da demanda energética da população, que atualmente é atendida por fontes não renováveis como as térmicas, passaria a ser atendida pelo sistema em estudo.

A utilização de um sistema híbrido baseado em energias renováveis vai ao encontro de duas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) com as quais o Brasil se comprometeu na 21ª Conferência das Partes (COP21) da UNFCCC: aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18 % até 2030, e alcançar uma participação estimada de 45 % de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030 [7].

Além disso, também vai ao encontro de dois dos dezessete objetivos estratégicos de desenvolvimento sustentável da ONU: objetivo 7 - Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos, e objetivo 11 - Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis [8].

A inserção de novas energias renováveis no fornecimento de energia do município de Guarapuava, no estado do Paraná, confere uma maior participação de energias renováveis na matriz energética do município, aumentando, consequentemente, a participação de energias renováveis na matriz energética brasileira. Somado a isso, a utilização de sistemas híbridos pode obter resultados de geração de energia elétrica a valores inferiores do que a geração tradicional, caminhando no sentido de redução do custo global de energia elétrica, tornando-a cada vez mais acessível a mais pessoas. No caso específico da geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos na cidade de Guarapuava, a geração de eletricidade nessa cidade se torna mais sustentável, reduzindo a dependência dos combustíveis fósseis, além de auxiliar na redução do lixo urbano, tornando a cidade mais sustentável.

O objetivo geral deste estudo é a avaliação do potencial de geração de energia elétrica no sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico proposto, que seria alimentado pelos RSUs que atualmente são destinados ao Aterro Municipal de Guarapuava e pela radiação solar incidente na região. Esta proposta é composta por dois subsistemas: o conjunto motor de combustão interna e o conjunto de painéis solares fotovoltaicos. A partir da modelagem e simulação do sistema proposto, é analisado o potencial de geração de energia híbrida para atendimento da demanda energética do município,

assim como é calculada a eficiência energética do processo.

São os objetivos específicos deste estudo:

- Analisar o potencial de produção de biogás a partir dos resíduos sólidos urbanos do município;
- Analisar o potencial de geração de energia a partir do biogás estimado;
- Analisar o potencial de geração de energia a partir da radiação solar no município;
- Analisar a eficiência energética do sistema híbrido proposto;
- Analisar economicamente a viabilidade do sistema híbrido proposto.

1 Revisão Bibliográfica

1.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

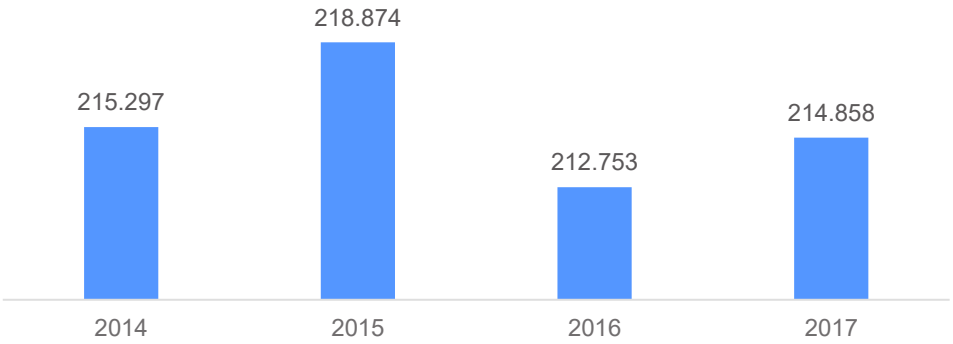
Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), também chamados de lixo urbano, são os resíduos do consumo diário do ser humano, como embalagens de produtos, móveis, roupas, garrafas, latas, restos de comida, papéis, eletroeletrônicos, baterias e entre outros. Não são considerados como RSU as águas residuais, resíduos de processos industriais, carroceria de automóveis, cinzas de combustão e detritos de construção e demolição [2].

Globalmente, junto com o crescimento da urbanização, a geração de resíduos sólidos urbanos tem aumentado. Em 1900, 13% da população mundial vivia em centros urbanos e produziam cerca de 110 milhões de toneladas RSU por ano. Já no ano 2000, 49% da população mundial vivia em centros urbanos, produzindo cerca de 1,1 bilhões de toneladas de RSU. Estudos apontam ainda que em 2025, a produção de RSU será equivalente ao dobro da produção de 2000, ou seja, atingiremos a marca de 2,2 bilhões de toneladas de RSU produzidas ao ano no mundo [1].

O crescimento das cidades no mundo geralmente apresenta grandes problemas ligados ao aumento da população, da área ocupada pela cidade, assim como pela falta de desenvolvimento de infraestrutura. Apesar dos esforços para reduzir, reciclar e reutilizar resíduos, de modo geral, ainda há uma quantidade crescente de resíduos que precisam ser descartados em aterros sanitários [3].

No Brasil, a geração total de RSU, após ter caído em 2016 2,8% comparativamente com 2015, voltou a crescer em 2017 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Gráfico 1 - Geração total de RSU no Brasil (t/dia)



Fonte: [4] e [5]

Em 2017 [5], o índice de cobertura de coleta dos RSU foi de 91,2%, o que significa que 6,9 milhões de toneladas de RSU não foram devidamente coletadas no ano de 2017. Das demais 71,5 milhões de toneladas de RSU coletadas, apenas 59,1% foram corretamente dispostos em aterros sanitários.

A recuperação da energia a partir dos RSU, além de minimizar o impacto ambiental oriundo dos resíduos, auxilia sendo uma fonte de energia local para a comunidade [3].

1.2 Geração de Biogás a partir de RSU

Por volta de 1630, Jean Baptista van Helmont foi o primeiro a constatar que um gás inflamável era formado a partir de matéria orgânica em decomposição. Em 1667, Thomas Shirley descreveu o vazamento de um gás inflamável de uma mina de carvão na cidade de Wigan, no Reino Unido. No ano de 1764, Benjamin Franklin registrou que foi capaz de incendiar a superfície de um lago lamacento na cidade de Nova Jersey, nos Estados Unidos. Em 1776, Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta concluiu que havia uma relação direta entre a quantidade de matéria orgânica em decomposição com a quantidade de gás inflamável que se era obtida. Ele foi o primeiro pesquisador a descrever de forma científica a formação deste gás inflamável em sedimentos depositados no fundo de lagos e pântanos. [6].

Em 1884, Louis Pasteur considerou que esta fermentação podia constituir uma fonte de energia para aquecimento e iluminação, devido a presença de metano (CH_4), gás de elevado poder calorífico [7]. Em experimento realizado, Louis Pasteur coletou o gás a uma temperatura de 35ºC e, o volume coletado foi tão grande que ele concluiu a fermentação anaeróbica de dejetos, a determinada circunstâncias, seria capaz de suprir as necessidade de aquecimento e iluminação da cidade de Paris [6].

A fração orgânica dos RSU pode ser explorada em condições controladas, a fim de se reduzir seu impacto ambiental e gerar energia renovável. Os processos de tratamento de RSU mais utilizados são compostagem e digestão anaeróbia [8].

Compostagem é o processo de decomposição biológica da matéria orgânica sob condições controladas de temperatura e umidade, com a presença de oxigênio (aerobiose), gerando um produto estável chamado de composto ou adubo orgânico [9].

Na digestão anaeróbia (digestão na ausência de oxigênio gasoso), a

transformação da matéria orgânica em diversas substâncias químicas ocorre por sucessivos processos de degradação, em decorrência da atuação de diferentes bactérias envolvidas [8]. As quatro principais etapas de da digestão anaeróbia são: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

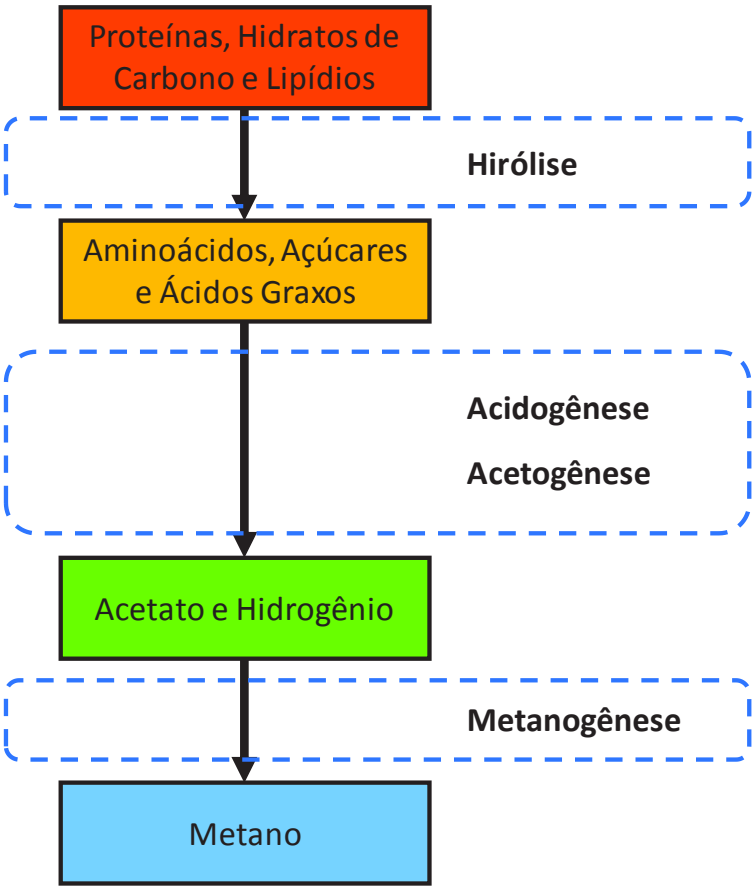


Figura 1 – Etapas da Digestão anaeróbia

Fonte: Adaptado de [10]

Na hidrólise, ocorre a conversão de biopolímeros em seus monômeros, por meio da ação de bactérias hidrolíticas. Nesta etapa, as proteínas são transformadas em aminoácidos, os hidratos de carbono em açúcares e os lipídios em ácidos graxos e glicerol [10].

Na acidogênese, os produtos da hidrólise são transportados para o interior das células, onde são fermentados os aminoácidos e os açúcares e os ácidos graxos são oxidados. Já a acetogênese é um processo intermediário, onde é possível obter um substrato apropriado para as bactérias *archaea* metanogênicas por ação de dois grupos distintos: as bactérias acetogênicas utilizadoras de hidrogénio (homoacetogênicas) e as

bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio (sintróficas). As bactérias homoacetogênicas produzem acetato a partir de H_2 e CO_2, enquanto as bactérias sinotróficas promovem a oxidação dos ácidos graxos voláteis em acetato e hidrogênio [10].

A metanogênese é realizada por bactérias estritamente anaeróbias, que convertem o acetato e o os gases H_2 e CO_2 em metano (CH_4), conforme apresentado nas equações (1) e (2).

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2 \quad (1)$$

$$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \quad (2)$$

O biogás é um dos produtos da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, e é composto principalmente por metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2) [11]. No entanto, outros resíduos podem também podem existir na mistura, como sulfeto de hidrogênio (H_2S), hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), amônia (NH_3), oxigênio (O_2) e monóxido de carbono (CO) [12].

Atualmente há diversas empresas que detêm tecnologias para a produção de biogás a partir de RSU, cada uma com suas características específicas. A Tabela *1* apresenta a comparação de pontos fortes e fracos entre as tecnologias das empresas Dranco, Kompogas, Valorga, Laran, Kompoferm PLus, Bekon Dry Cicle Fermenter e BIOferm System.

Tabela 1 – Comparações entre as tecnologias de produção de Biogás

Tecnologia	Pontos Fortes	Pontos Fracos
Dranco	• Agitação via recirculação por bombas hidráulicas; • Inexistência de elementos internos ao reator, reduzindo problemas e demanda de manutenção; • Existência de departamento de pesquisa e desenvolvimento	• Necessidade de correção do teor de matéria seca com adição de insumos que necessitam ser adquiridos (normalmente terras diatomáceas); • Necessidade de constante recirculação do material em digestão para impedir a

Tecnologia	Pontos Fortes	Pontos Fracos
	competente, ativo em publicações e melhorias de processo.	sedimentação dos mesmos » Sistema de introdução do material via bombas do tipo pistão, que necessitam limpeza manual diária; • Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem pré-tratamento.
Kompogas	• Sistema de agitação eficiente, apesar da presença de elementos mecânicos internos; • Experiência no mercado; • Experiência com diferentes tipos de substratos.	• Sistema de agitação mecânico e interno ao reator, sendo que a manutenção dos mesmos requerem a interrupção do processo; • Possibilidades de falhas no sistema de extração, sendo necessário um procedimento manual de desobstrução da tubulação; • Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem pré-tratamento.
Valorga	• Engenharia do reator permite a instalação de plantas com elevada capacidade instalada • Agitação pneumática, s;em elementos mecânicos; • Maior simplicidade construtiva que as tecnologias secas tradicionais.	• Sistema de agitação via injeção de biogás comprimido na parte inferior, demandando limpeza manual diária para desobstrução dos canais de injeção; • Necessidade de constante recirculação do material em digestão, para impedir a sedimentação dos mesmos; • Sistema de introdução do material via bombas do tipo pistão, que necessitam limpeza manual diária;

Tecnologia	Pontos Fortes	Pontos Fracos
		• Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem pré-tratamento.
Laran	• Sistema de extração eficiente; • Experiência no mercado.	• Sistema de agitação mecânico e interno ao reator, sendo que a manutenção dos mesmos requerem interrupção do processo; • Sistema de extração por bomba de vácuo, necessitando tanques e equipamentos adicionais; • Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem pré-tratamento.
Kompoferm PLus	• Índices de desempenho comprovados em escala real; • Robustez do processo biológico; • Suporta maiores teores de impróprios se comparada com outras tecnologias; • Introdução de ar pela base do reator ao final do processo de degradação anaeróbia, a fim de promover uma secagem prévia do material antes de sua remoção; • Possuem porta inteiriça facilitando a vedação; • Utilização de grade lateral e canaletas ao longo dos túneis para auxiliar na drenagem do lixiviado.	• As grades laterais tendem a colmatar ao longo do tempo, prejudicando o fluxo do lixiviado, sendo necessário realizar a limpeza periódica das mesmas; • Emissões fugitivas de metano.
Bekon Dry Cicle Fermenter	• Índices de desempenho comprovados em escala real; • Robustez do processo biológico;	• Deficiência no processo de aeração do material; • Emissões fugitivas de metano.

Tecnologia	Pontos Fortes	Pontos Fracos
	• Suporta elevado índice de impróprios; • quecimento do piso; • Introdução de ar pelas laterais;s túneis possuem porta inteiriça, com abertura para cima, evitando acidentes; • Não utiliza gasômetro para acumulação do biogás, reduzindo custos da instalação.	
BIOferm System	• Índices de desempenho comprovados em escala real; • Robustez do processo biológico; • Suporta elevado índice de impróprios; • Canaletas, frontal e transversal ao reator, para coleta do lixiviado.	• Deficiência no processo de aeração do material; • Emissões fugitivas de metano.

Fonte: [13]

A partir desta comparação, é possível observar que todas as tecnologias disponíveis possuem tanto pontos fortes quanto pontos fracos. A seleção da tecnologia mais adequada depende da quantidade e característica do RSU disponível, bem como dos custos envolvidos na aquisição da tecnologia.

Muitas plantas de digestão anaeróbica ao redor do mundo operam utilizando a fração orgânica dos RSU (RSUO) para a produção de biogás. A utilização da digestão anaeróbica como pré-tratamento antes do descarte em um aterro sanitário oferece várias vantagens, como a minimização dos resíduos dispostos nos aterros e contribuição para a reciclagem. A digestão anaeróbica permite produzir energia renovável e uma melhor qualidade de tratamento dos resíduos, mas requer conhecimento técnico específico e necessita de investimentos financeiros para construção da planta de digestão [3].

1.3 Características do Biogás

O biogás é um dos produtos da decomposição anaeróbia da matéria orgânica e, embora seja composto principalmente por metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), é também constituído por outras substâncias como sulfeto de hidrogênio (H_2S), hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), amônia (NH_3), oxigênio (O_2) e monóxido de carbono (CO) [12]. A depender da origem do biogás, sua composição química é diferente. Na Tabela *2* estão listadas a porcentagem mol (% mol) dos principais componentes do biogás.

Tabela 2 – Composição básica do Biogás por origem

Origem	CH_4 (%)	CO_2 (%)	N_2 (%)	O_2 (%)	H_2S (ppm)	Fonte
Abatedouro de aves	68,2	29,6	N.D.	N.D.	1.897	[14]
Aterros sanitários	45-62	24-40	1-17	1-2,6	15-427	[12]
Bananicultura	38-66	33-60	N.D.	N.D.	0	[15]
Bovinocultura (leiteira)	59,6	39,1	N.D.	N.D.	329	[14]
Digestores de esgoto	58-65	33-40	1-8	<1	0-24	[12]
Mandioca	54,3	44,9	N.D.	N.D.	97	[14]
Resíduos orgânicos	40-75	25-40	0,5-2,5	0,1-1	1.000-5.000	[16]
Suinocultura (produção de leitões)	68,4	30,6	N.D.	N.D.	1.309	[14]
Suinocultura (terminação)	62	37	N.D.	N.D.	2.782	[14]
Vinhaça (beterraba)	47	53	N.D.	N.D.	N.D.	[16]
Vinhaça (cana)	60	40	N.D.	N.D.	<10.000	[17]

Fonte: O autor

O poder calorífico inferior (PCI) do biogás está relacionado com a concentração de metano existente na mistura. Desta forma, quanto maior a concentração de metano no biogás, maior sua capacidade de gerar energia, conforme apresentado na Tabela *3* [18].

Tabela 3 – Variação do PCI em relação à composição do biogás

Composição do biogás		Poder Calorífico Inferior (Kcal/kg)
CH_4 (%)	CO_2 (%)	
10	90	465,4
40	60	2.333,5
60	40	4.230,0
65	35	4.831,1
75	25	6.253,0
95	5	10.469,6
99	1	11.661,0

Fonte: Adaptado de [18]

Para a comparação da equivalência energética entre o biogás e outros combustíveis, é necessário, então, definir a composição química do biogás. A título de comparação, é apresentado na Tabela *4* o poder calorífico de alguns outros combustíveis [19].

Tabela 4 – Poder Calorífico Inferior de outros combustíveis

Combustível	Poder Calorífico Inferior (Kcal/kg)
Madeira	4.500
Álcool etílico 96º GL	6.400
Carvão vegetal	7.620
Briquetes de carvão	8.000
BPF (óleo combustível)	8.400
BTE (óleo combustível)	10.400
GLP	11.000

Fonte: Apatado de [19]

Desta forma, é possível observar que, dependendo da composição química do biogás, este pode possuir poder calorífico superior ao GLP, ou mesmo inferior à madeira.

O biogás possui ainda em sua mistura uma série de impurezas, que podem

causar diversos impactos dependendo de sua concentração e combinação, conforme apresentado na Tabela *5*Tabela 5 – Impactos das impurezas no biogás. O tratamento destas impurezas ocorre por diferentes processos [20].

Tabela 5 – Impactos das impurezas no biogás

Impureza	**Impacto**
H_2O	Corrosão devido à reação com H_2S, NH_3 e CO_2. Acumulação de água. Condensação e/ou congelamento em pressões elevadas
Poeiras	Deposição em motores e tanques de armazenamento
H_2S	Corrosão. Concentração tóxica de H_2S (>5 cm^3 /m^3). SO_2 e SO_3 são formados a partir de sua combustão, os quais são mais tóxicos que o H_2S e em conjunto com a água provocam corrosão
CO_2	Afeta o poder calorífico inferior
Siloxanos	Formação de SiO_2 e micro cristais de quartzo durante a combustão. Depósição provocando abrasão nas superfícies
NH_3	Corrosivo quando dissolvido em água
Cl^{-3}	Corrosão em motores de combustão
F^-	Corrosão em motores de combustão

Fonte: [20]

1.4 Geração de bioenergia a partir do Biogás

A energia produzida através da transformação química do biogás é conhecida como bioenergia, sendo esta uma energia renovável. Segundo [21] e [22], as principais utilizações do biogás são:

- Produção de calor e/ou vapor;
- Geração de eletricidade através de motores a gás estacionários (*combined heat and power* – CHP);
- Fornecimento de energia térmica ou elétrica para indústrias por meio de Caldeiras a gás;
- Injeção na rede de gás natural através da purificação do biogás a biometano, possibilitando posterior aproveitamento como energia elétrica, térmica e energia veicular;

- Produção de produtos químicos e/ou proteínas.

O biogás, quando utilizado em turbinas e motores acoplados a geradores elétricos, são capazes de produzir energia elétrica através da transformação da energia térmica proveniente da combustão. A vantagem da geração de bioenergia oriunda do biogás é a independência das condições climáticas, conferindo alta confiabilidade energética ao sistema.

Dentre as tecnologias existentes para a conversão de energia do biogás em eletricidade, os motores possuem maior eficiência, e as turbinas a gás possuem maior eficiência global de conversão quando operadas em co-geração (calor e eletricidade) [23].

Tabela 6 - Comparação de tecnologias para geração de eletricidade a partir de biogás

	Motores a gás	**Motores a biogás + diesel**	**Turbinas a gás para biogás de pequeno/médio porte**	**Microturbinas (CAPSTONES)**
Potência	30 kW -20 MW	N.D.	500 kW – 150 MW	30 kW – 100 kW
Rendimento com biogás	30% a 34%	30% a 35%	20% a 30%	24% a 28%

Fonte: Adaptado de [23]

Motores são máquinas destinadas a converter qualquer forma de energia (como térmica, hidráulica, elétrica ou química) em energia mecânica. Os motores de combustão interna (MCI), especificamente, são equipamentos capazes de transformar a energia química do combustível em trabalho mecânico do eixo [24].

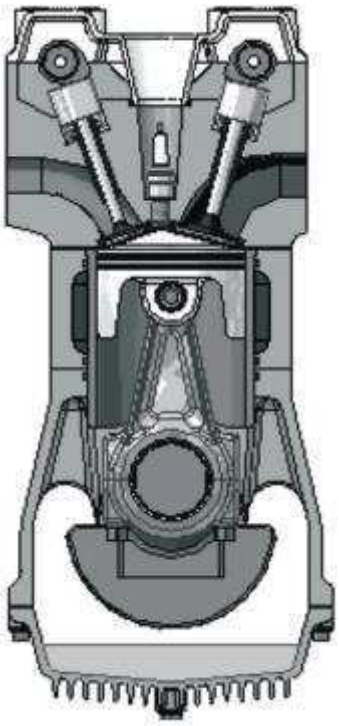


Figura 2 - Motor de combustão interna

Fonte: [24]

A potência caracteriza a rapidez de realização de determinado trabalho, ou seja, é a taxa de trabalho, e pode ser medida a partir da seguinte equação:

$$P = \frac{W}{t} \qquad (3)$$

Sendo,

P = potência;

W = trabalho realizado;

t = tempo em que o trabalho é realizado.

Durante a combustão no MCI, a energia química é transformada em energia mecânica, fazendo o eixo do motor girar. Quando este gira, a quantidade de trabalho é obtida pelo produto do torque pelo deslocamento angular:

$$P = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{T\Delta\theta}{\Delta t} = T \,.\, \omega \qquad (4)$$

Sendo,

T = torque;

Ω = velocidade angular.

O dínamo é um equipamento que permite converter energia mecânica em energia elétrica. Ele é formado por um imã fixo em um eixo móvel, ao redor do qual, sem contato físico, existe uma bobina. O movimento do imã causado pelo eixo resulta em uma variação do campo magnético, que gera uma corrente elétrica induzida.

$$\varepsilon = \frac{d\phi}{dt} \qquad (5)$$

Sendo,

E = força eletromotriz;

dΦ/dt = variação do fluxo magnético no intervalo de tempo.

Considerando que o circuito possui resistência, a corrente elétrica resultante é dada por:

$$i = \frac{\varepsilon}{R} \qquad (6)$$

Sendo,

I = corrente induzida;

R = resistência elétrica do circuito.

Desta forma, um motor de combustão interna acoplado a um dínamo, pode-se obter um gerador elétrico, que transforma a energia química do combustível em energia elétrica.

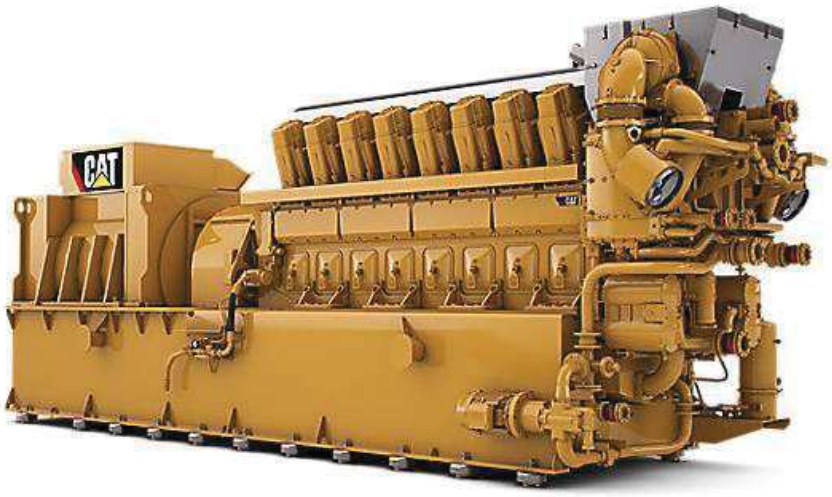


Figura 3 - Gerador a gás

Fonte: [25]

1.5 Energia Solar Fotovoltaica

O Sol é a estrela central do nosso Sistema Solar, composta por cerca de 90% de hélio, 9% de hélio e apenas 1% de outros elementos. A energia liberada por ele é resultado de inúmeras reações de fusão nuclear que ocorrem em seu núcleo, e é irradiada em todas ad direções do espaço. Uma pequena fração desta energia atinge a Terra, dando suporte à vida no planeta. [26]

Diferente de outras fontes de energia convencionais como hidroelétricas ou combustíveis fósseis, a energia solar é temporalmente intermitente, pois possui forte relação com as condições meteorológicas locais (como a concentração de gases na atmosfera, a presença e quantidade de nuvens, entre outros) e fatores astronômicos associados aos movimentos de translação e rotação da terra [27].

A duração do dia e a quantidade de energia solar incidente em um ponto qualquer da superfície terrestre apresenta variabilidade temporal característica de dois ciclos: o ciclo anual e o ciclo diário.

O ciclo anual ocorre em decorrência do movimento de translação da Terra em torno do Sol. As estações do ano (verão, outono, inverno e primavera) são determinadas pelo momento em que o Sol atinge a maior declinação em latitude medida a partir do Equador (solstício) e o instante em que o Sol cruza o Equador terrestre (equinócios) [27].



Figura 4 – Esquema representativo dos solstícios e equinócios

Fonte: [27]

Já o ciclo diário ocorre em decorrência do movimento de rotação da Terra em torno de seu próprio eixo. Para entender este ciclo, faz-se necessário definir algumas relações geométricas entre os raios solares e a superfície da Terra (Figura *5*).

O ângulo horário solar, ou ângulo horário do Sol (ω) é definido como o deslocamento angular aparente do Sol (direção Leste-Oeste), a partir do meridiano local, devido ao movimento de rotação da Terra. Cada hora corresponde a 15º de variação do ângulo de horário do Sol. Por convenção, adota-se valores positivos para período da manhã, e valores negativos para o período da tarde, sendo assumido como valor zero ao meio dia (12:00 h). [28]

A declinação solar (δ) é o ângulo formado pela inclinação do plano equatorial da Terra e a linha de direção Sol-Terra [27].

O ângulo zenital solar, ou ângulo zenital (θz) é o ângulo formado entre o feixe solar e a vertical no ponto de observação (Zênite) [28]. Ele pode ser calculado através do valor da latitude local (φ), a declinação solar (δ) e o ângulo horário solar (ω). O ângulo zenital é equivalente a 90º quando está no horizonte ao nascer ou se pôr [27].

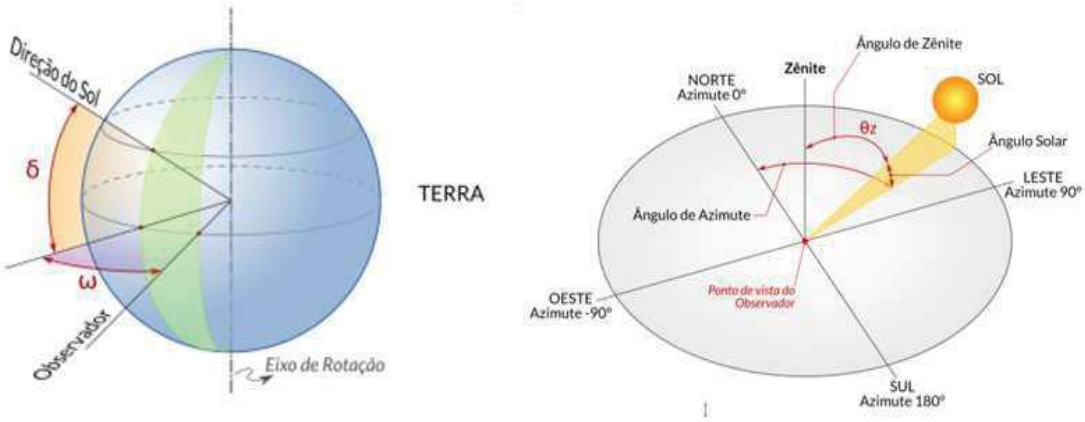


Figura 5 – Ângulos notáveis em solarimetria

Fonte: [27]

A energia solar incidente na Terra sofre também influência de processos físicos da atmosfera que reduzem a intensidade da radiação que chega à superfície do planeta. A atmosfera da Terra é composta por gases como Nitrogênio (N_2), Oxigênio (O_2), Gás Carbônico (CO_2) e Ozônio (O_3), além de aerossóis (particulados) [27].

A Figura *6* mostra, de forma simplificada, as formas de decomposição da radiação solar que ocorrem na atmosfera terrestre.

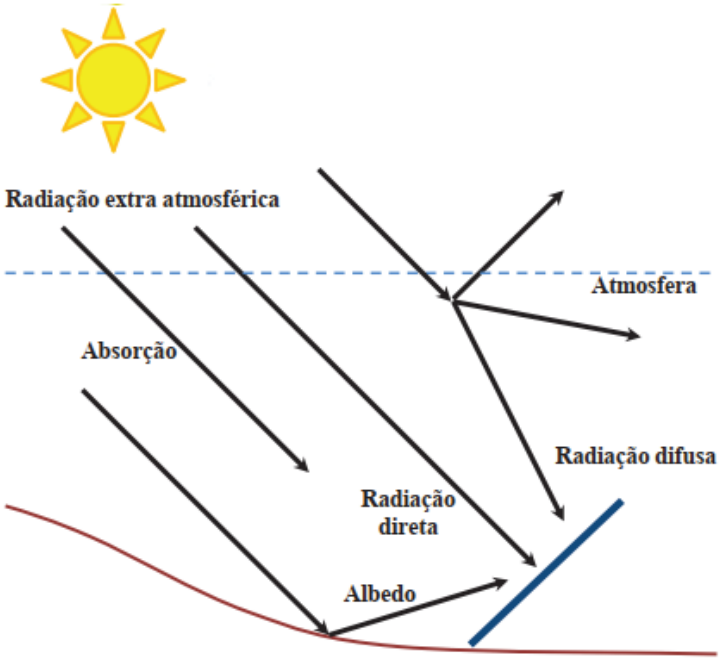


Figura 6 – Processos simplificados de decomposição da radiação solar na atmosfera

Fonte: [28]

A radiação direta é a parte da radiação solar atinge diretamente a superfície de observação, sem sofrer interferência. Parte da radiação solar é espalhada pelas partículas em suspensão da atmosfera, onde parte desta radiação espalhada atinge a superfície de radiação, o que é conhecida como radiação difusa. Outra parte da radiação é absorvida pela atmosfera. Por último, parte da radiação solar atinge o solo é refletida por ele para a superfície de observação, o que é conhecido como albedo. Desta forma, a radiação solar incidente sobre uma superfície de observação é a soma da radiação direta, da radiação difusa e do albedo incidentes sobre a superfície.

Desta forma, a Irradiância Global Horizontal (G) é a taxa de energia solar por unidade de área (Wh/m^2) que atinge uma superfície horizontal, composta pela Irradiância direta e difusa, conforme apresentado na equação

(7) , onde a incidência direta representa a parcela proveniente diretamente do sol, e a incidência difusa engloba a radiação proveniente das demais direções incidentes sob a superfície horizontal [27].

$$G = G_{dif} + G_{dir} \quad (7)$$

Sendo,

G : Irradiância global horizontal;

G_{dif}: Irradiância difusa;

G_{dir}: Irradiância direta;

Considerando que a superfície horizontal pode ser inclinada em uma angulação θ_z, podemos calcular a irradiação no plano [29] inclinado através da seguinte equação:

$$\frac{G_{d,\beta}}{G_{d,h}} = \frac{G_d Cos\theta}{G_d Cos\theta z} = \frac{Cos\theta}{Cos\theta z} \quad (8)$$

Sendo,

G_d: Irradiância direta normal;

$G_{d,h}$: Irradiância direta horizontal;

$G_{d,\beta}$: Irradiância direta no plano inclinado;

θ_z: Ângulo zenital solar;

β: Ângulo de inclinação do plano.

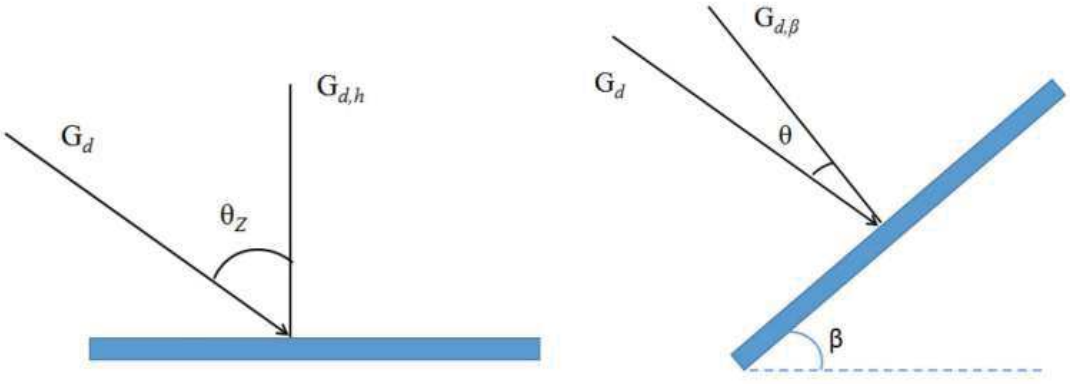


Figura 7 - Componentes da radiação solar em um plano inclinado

Fonte: [29]

Parte da energia emitida pelo Sol pode ser captada na Terra através de painéis solares fotovoltaicos (FV). A eficiência da conversão da energia depende diretamente da eficiência da tecnologia aplicada nos painéis.

Em 1839, o primeiro efeito fotovoltaico foi observado por Edmond Becquerel. Ele verificou que placas metálicas, mergulhadas em um eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à determinadas faixas de frequências de luz [30].

A radiação solar apresenta um comportamento ondulatório, que pode ser interpretada como energia transmitida por partículas denominadas fótons. Quanto mais intenso for um feixe de luz, maior é o número de fótons nele presente. A energia E de cada fóton que constitui um feixe de luz é dada pela equação

$$E = hf \quad (9)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (10)$$

Sendo,

h: Constante de Planck;

c: Velocidade da luz no vácuo;

λ: Comprimento de onda.

A energia de ligação de cada elétron em um material é denominada função

trabalho. Quando o feixe de fótons incide sobre uma superfície de um material, se a energia do fóton (E) for maior que a função trabalho do material, o elétron pode ser libertado absorvendo toda a energia do fóton incidente. Como a função trabalho varia em função do material da superfície no qual o feixe de fótons atinge, o efeito fotoelétrico ocorrerá para cada material a partir de um valor mínimo de frequência, independente da intensidade do feixe de luz [31]. Desta forma, a radiação solar, a depender do material na qual ela incide, é capaz de gerar corrente elétrica.

As células fotovoltaicas são equipamentos desenvolvidos em materiais semicondutores, como silício, para facilitar a liberação dos elétrons em função da radiação solar. Quando associadas em grupos e encapsuladas, são conhecidas como módulos fotovoltaicos.

A potência entregue pelo painel fotovoltaico pode ser expressa segundo a equação (11) [28]:

$$P_{CFV} = \eta_i . N_{FV} . A_{FV} . I_{T(\beta)} \qquad (11)$$

Sendo,

P_{CFV}: Potência entregue pelo conjunto fotovoltaico (W);

η_i: Eficiência instantânea dos painéis fotovoltaicos;

N_{FV}: Número de painéis fotovoltaicos (unidades);

A_{FV}: área de um painel fotovoltaico do conjunto (m^2);

$I_{T(\beta)}$: radiação global num plano inclinado (W/m^2).

A eficiência instantânea dos painéis fotovoltaicos pode ser expressa conforme a equação (12) [28]:

$$\eta_i = \eta_r \eta_{mp} [1 - \beta (T_a - T_r) - \beta I_{T(\beta)} \left(\frac{NOCT - 20}{800}\right) (1 - \eta_r \eta_{mp})] \qquad (12)$$

Sendo,

ηr: Eficiência de referência do painel fotovoltaico;

η_{mp}: Eficiência do ponto de máxima potência. Este é considerado igual a 100% quando considerado um sistema de ótimo seguimento [28];

β: Coeficiente de temperatura de eficiência do conjunto (1/ºC);

T_c: Temperatura média da célula (ºC);

T_r: Temperatura de referência para a eficiência da célula. Este é considerado

25ºC;

T_a: Temperatura ambiente (ºC);

NOCT: Temperatura nominal de operação da célula (ºC).

Na Tabela *7* são apresentados parâmetros de diferentes modelos de painéis fotovoltaicos.

Tabela 7 – Parâmetros de diferentes modelos de painéis FV

Fabricante	Modelo	η_r (%)	β (%/ºC)	NOCT (ºC)	Fonte
Trinasolar	DD05A.08(II)	16,8	0,39	44	[32]
JA Solar	JAM60D00 -310/BP	18,7	0,38	45	[33]
Canadian Solar	CS3L-330	17,8	0,37	40	[34]
GLC	GCL-P6/60	16,6	0,43	45	[35]
Longi Solar	LR6-72HBD	18,5	0,37	40	[36]
Risen Energy	RSM60-6-270P	16,5	0,39	45	[37]
Yingli Solar	YL275C-30b	16,0	0,42	46	[38]

Fonte:O autor

Outra forma de se indicar a radiação solar em determinado local é através do número de Horas de Sol Pleno (HSP). O HSP é definido como o número de horas em que o Sol brilharia em sua potência máxima convencional, que é 1 kW/m² [39]. Desta forma, pode-se calcular o HSP:

$$HSP = \frac{I_{T(\beta)}}{1.000} \quad (13)$$

Sendo,

$I_{T(\beta)}$: radiação global num plano inclinado (W/m^2).

O número de HSP não necessariamente é um intervalo de tempo real, mas sim um valor equivalente. O intervalo de tempo real de insolação (horas reais desde o nascer do Sol até o pôr do Sol em determinada localização) é maior que o número de HSP, isto porque a radiação global nas extremidades do intervalo de insolação real é baixa, aumentando quando seguimos o trajeto do sol em direção à sua posição vertical.

A Figura *8* mostra a comparação entre o número de horas de insolação vs. O número de HSP. Nesta figura, é possível ainda observar o efeito da variação climática sobre o HSP.

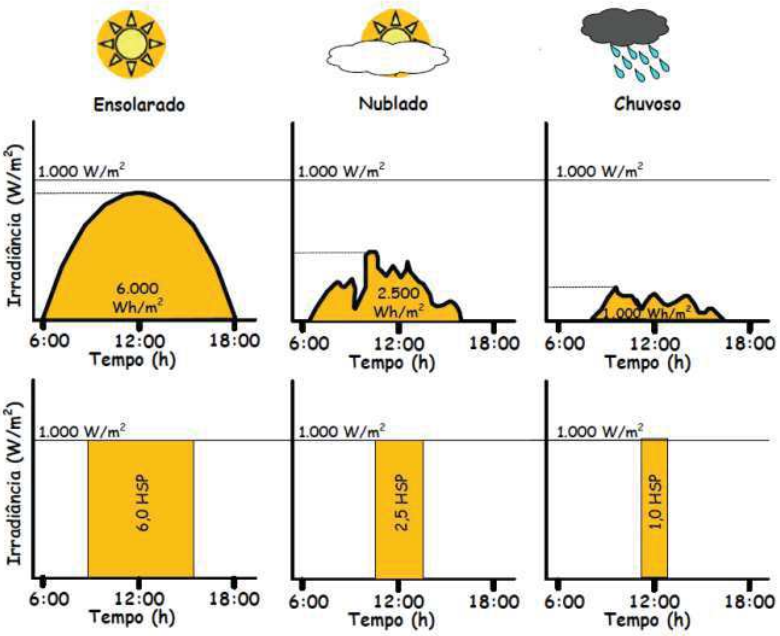


Figura 8 - Comparação da insolação real vs. HSP

Fonte: [29]

1.6 Sistemas Híbridos

Sistemas híbridos são aqueles que utilizam mais de uma fonte de energia, trazendo flexibilidade e confiabilidade à geração de energia. A utilização de fontes de energia diferentes permite que uma fonte supra a falta temporária de outra, trazendo menor risco de interrupção [40].

Comumente os sistemas híbridos são utilizados em sistemas isolados, uma vez que não há fornecimento de energia elétrica convencional para atender a demanda de uma pequena comunidade local. Entretanto, se utilizados ligados à rede convencional, permitem reduzir o custo da energia consumida, através de ganhos de otimização da geração.

Os registros de início de instalações de sistemas híbridos datam a década de 1970, objetivando a redução do consumo de óleo combustível, muito provavelmente em decorrência da busca por alternativas energéticas à crise do petróleo de 1973 [40]. A

partir do final da década de 1990, a utilização dos sistemas híbridos passou a ter motivação também ambiental: Reconhecendo seu papel como parte das causas da mudança climática na Terra, o ser humano passou a buscar e adotar políticas para estimular a redução das emissões atmosféricas e, gradualmente, migrar para uma matriz energética mais renovável.

Os sistemas híbridos podem ser classificados de diversas formas. As mais usuais são: quanto a sua interligação com a rede elétrica convencional, quanto a sua prioridade de uso das fontes de energia e quanto a sua configuração [40].

- Quanto a sua interligação com a rede elétrica convencional: Os sistemas híbridos podem ser isolados, se suprem a carga de determinada comunidade de forma totalmente independente da rede elétrica do sistema interligado, ou interligados, se a energia gerada é entregue à rede elétrica convencional;
- Quanto a sua prioridade de uso das fontes de energia: São considerados baseados em energias não renováveis se a geração de energia por fontes renováveis ocorre apenas para suprir a carga no período de baixa demanda, quando a fonte de energia não renovável operaria com baixa eficiência. Por outro lado, é considerado baseado em recurso renovável se a geração por fontes não renováveis ocorre apenas em períodos que a geração renovável não supre a demanda de carga.
- Quanto a sua configuração: São considerados em série quando as fontes de energia são utilizadas em sequência para transportar energia. São considerados chaveados se a demanda por energia pode ser suprida diretamente por qualquer um dos sistemas, mas não ao mesmo tempo. Por fim, são considerados em paralelo quando as fontes de energia podem suprir a demanda simultaneamente.

1.7 Pesquisas recentes

De modo a verificar o estado da arte quanto a sistemas híbridos biogás-solar fotovoltaico, foi realizada uma pesquisa dos dez artigos mais recentes publicados na base Web of Science[1]. A pesquisa nesta base foi realizada no dia 31/03/2019, e foram utilizados os termos de pesquisa "*biogas*", "*solar*" e "*photovoltaic*", tendo como resultado

[1] Web of Science é uma plataforma referencial de citações científicas projetada para apoiar pesquisas científicas e acadêmicas. Endereço eletrônico: https://webofknowledge.com

138 publicações. Elas foram ordenadas por data (da publicação mais recente para a mais antiga), e foram selecionadas as 10 mais recentes.

A partir da análise das pesquisas selecionadas, foi feito um levantamento de correlação temática direta com o presente estudo. Destes, metade apresentam análises de sistemas híbridos com módulos a biogás e painéis solar-fotovoltaicos, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Dez publicações mais recentes com a temática “biogas”, “solar” e “photovoltaic” na base Web of Science

#	Título da publicação	Resumo	Correlação temática direta	Fonte
1	Life Cycle Analysis with Multi-Criteria Decision Making: A review of approaches for the sustainability evaluation of renewable energy technologies	Revisão dos métodos Análise de Ciclo de Vida (ACV) e Multi-Criteria Decision Making (MCDM) verificando-as como ferramenta para a avaliação da sustentabilidade dos sistemas de energias renováveis e obtenção de um conjunto de indicadores sustentáveis.	Não	[41]
2	Prospects of decentralized renewable energy to improve energy access: A resource-inventory-based analysis of South Africa	Análise de um sistema de energia descentralizado (DRE) para atender a demanda demanda energética na África do Sul. Análise de dois cenários: apenas com biogás e híbrido biogás-solar fotovoltaico.	Sim	[42]
3	Sustainable technology for energy and environmental benign building design	Proposta de atendimento da demanda energética de um edifício através de um sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico.	Sim	[43]
4	Toward a 100% renewable island: A case study of Ometepe's energy mix	Análise do potencial de um sistema híbrido eólico-biogás-solar fotovoltaico para atendimento de toda demanda da ilha Ometepe, República da Nicarágua.	Sim	[44]
5	Integrated Optimization Design of Combined Cooling, Heating, and Power System Coupled with Solar and Biomass Energy	Proposta de otimização de um sistema combinado de resfriamento, aquecimento e energia (CCHP), acionado por um sistema	Sim	[45]

#	Título da publicação	Resumo	Correlação temática direta	Fonte
		híbrido biogás-solar-fotovoltaico em uma pequena fazenda em Jinan, China.		
6	Energy management in commercial building microgrids	Proposta de um controle de 2 níveis para minimizar o desvio de carga da rede de um sistema híbrido de biogás-solar fotovoltaico-célular combustível-microturbina e baterias.	Não	[46]
7	Is a 100% renewable European power system feasible by 2050?	Modelagem de sete cenários para o sistema elétrico europeu com atendimento baseado apenas em energias renováveis (sistemas separados: eólica, solar, hidráulica, biomassa, biogás e geotermal)	Não	[47]
8	Anaerobic thermophilic trickle bed reactor as a promising technology for flexible and demand-oriented H_2/CO_2 biomethanation	Estudo de viabilidade técnica de um reator anaeróbio para biometanização a partir de H_2 e CO_2.	Não	[48]
9	An integrative approach for the water-energy-food nexus in beef cattle production: A simulation of the proposed model to Brazil	Proposição de um modelo híbrido biogás-solar para um ambiente de produção de bovinos de corte.	Sim	[49]
10	Photovoltaic Power Generation in Indian Prospective Considering Off-grid and Grid-Connected Systems	Análise do potencial de geração de energia elétrica solar na Índia.	Não	[50]

Fonte:O autor

Esta análise, mesmo que preliminar, reforça a significância e atualidade do tema, vez que metade da amostra selecionada analisam sistemas semelhantes ao proposto neste estudo.

Dos estudos com correlação temática direta a presente pesquisa, foram extraídas as principais contribuições trazidas por cada um deles, apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Cinco publicações mais recentes com correlação temática

#	Título da publicação	Principais Contribuição	Fonte
2	Prospects of decentralized renewable energy to improve energy access: A resource-inventory-based analysis of South Africa	Apresenta a perspectiva de geração de energia por fontes renováveis na África do Sul, corroborando a necessidade já apontada em documentos oficiais do governo, e fornecendo uma solução viável de acesso à energia elétrica para as comunidades que ainda não a tem.	[42]
3	Sustainable technology for energy and environmental benign building design	Utiliza o conceito de "tecnologia verde" ("*Green Science*") para o abastecimento auto-suficiente de um edifício, revestindo seu exterior com painéis fotovoltaicos, e produção de biogás a partir dos resíduos gerados por ele.	[43]
4	Toward a 100% renewable island: A case study of Ometepe's energy mix	Demonstrou o potencial de substituição das energiasd fósseis que abastecem a ilha de Ometepe por um sistema híbrido eólico-biogás-solar fotovoltaico. O potencial geotérmico da ilha foi estimado, mas sem conclusões definitivas sobre sua comercialidade.	[44]
5	Integrated Optimization Design of Combined Cooling, Heating, and Power System Coupled with Solar and Biomass Energy	Apresentou uma otimização multi-objetivo de um sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico, tomando como base uma pequena fazenda em Jinan. A viabilidade técnica e econômica foi comprovada pela redução de custos e emissões de poluentes.	[45]
9	An integrative approach for the water-energy-food nexus in beef cattle production: A simulation of the proposed model to Brazil	Analisou a viabilidade de um modelo híbrido biogás-solar em cinco estados brasileiros de diferentes regiões, com diferentes carcaterísticas metereológicas, o que permite uma compração de replicabilidade em	[49]

#	Título da publicação	Principais Contribuição	Fonte
		diferentes lugares, seja no Brasil ou em outros países.	

Fonte:O autor

2 Metodologia, materiais, limitações da pesquisa e métodos

2.1 Metodologia e Materiais

O presente estudo propõe a modelagem, simulação e avaliação do potencial de geração de energia elétrica, análise energética e econômica do sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico teórico modelado.

A metodologia utilizada é apresentada na Figura 9.

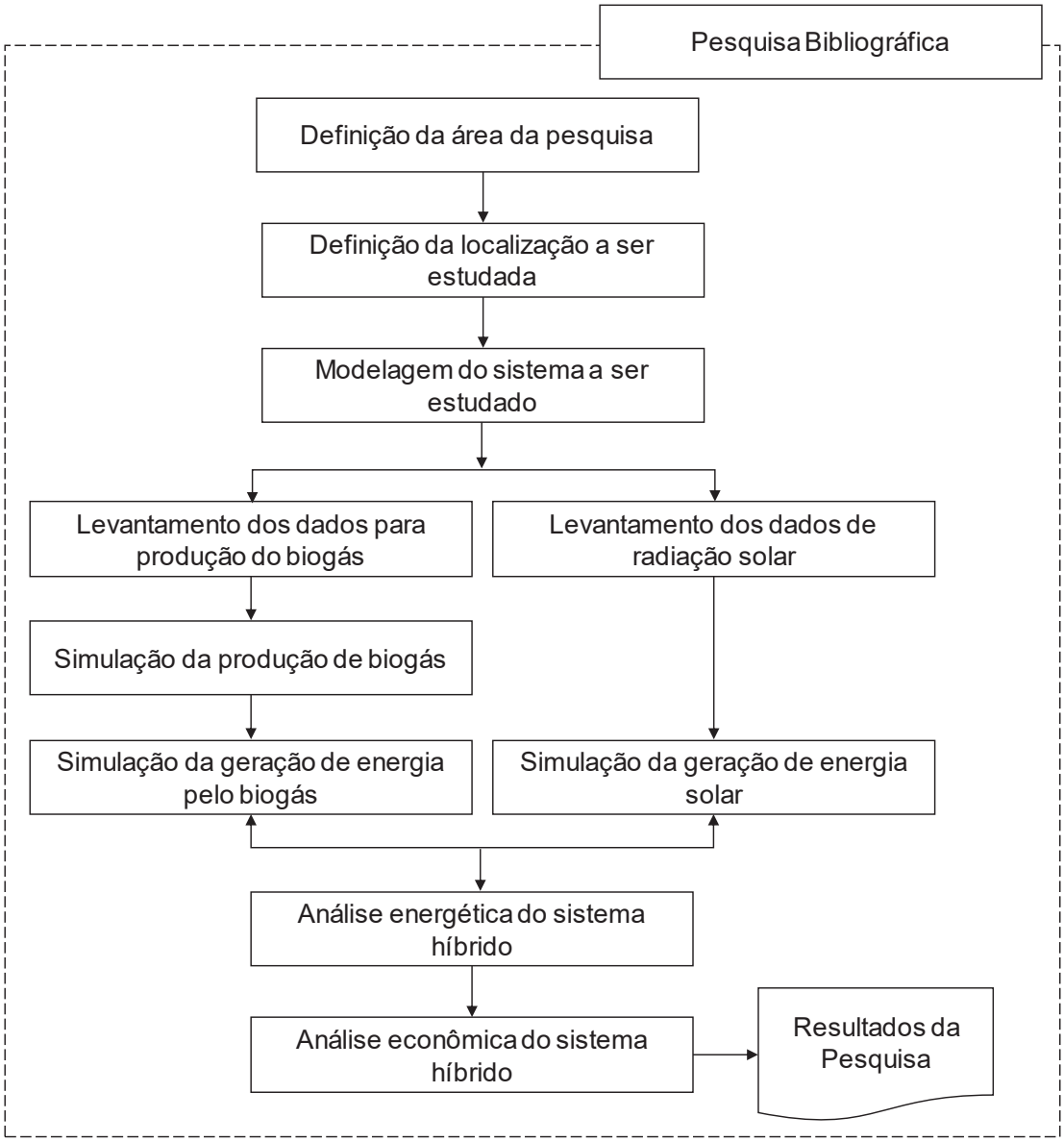


Figura 9 – Metodologia

Fonte: O autor

O presente estudo se inicia a partir da definição de sua área de pesquisa, com a situação problema e justificativas. A partir desta definição, é definida a localização a ser estudada e o sistema é modelado. Após essa definição e modelagem, são levantados os dados e informações necessárias para a simulação teórica.

A simulação de geração de energia a partir do biogás e a partir da fonte solar são realizadas em paralelo, cada qual com seus levantamentos de dados de entrada necessários aos. Durante todo o estudo, as pesquisas bibliográficas embasaram as premissas e análises, assim como são realizadas comparações com a literatura.

Dessa forma, o presente estudo trata-se de uma pesquisa descritiva, através da utilização de dados e informações obtidas em outras pesquisas e na literatura, A partir destes dados, são realizados cálculos teóricos e os resultados são comparados com outras pesquisas.

Para o presente estudo foram utilizadas as ferramentas MS EXCEL, para a realização dos cálculos, elaboração dos gráficos e tabelas, MS POWER POINT, para a elaboração dos fluxos e diagramas, e MW WORD, para a escrita e elaboração da dissertação.

2.2 Limitações da Pesquisa

As limitações da pesquisa são decorrentes das simplificações aplicadas nas simulações. São elas:

- Câmbio real/dólar constante para as conversões de valores entre as moedas, sem variação ao longo do tempo (prazo) do sistema híbrido;
- Não consideração de impostos sobre a simulação do sistema híbrido;
- Não consideração de pagamento de taxas de licenciamento ambiental para a implantação do sistema híbrido;
- Foi considerado o custo de operação e manutenção dos subsistemas (O&M) como uma taxa em função da produção de energia;
- A demanda energética da comunidade foi considerada constante ao longo dos anos, sem considerar impactos referentes a mudanças de hábitos de consumo ou variação populacional;
-

Todas as premissas utilizadas para a análise econômica serão apresentadas no item 3.4.1 - Premissas da análise.

2.3 Métodos

2.3.1 Conjunto Motor-gerador (CMG)

Neste estudo, entende-se como conjunto motor de combustão interna, já acoplado ao dínamo, funciona de modo a converter a energia química do biogás em energia elétrica.

A energia fornecida pelo combustível (E_{comb}) ao CMG é dada pela Equação (14) [51].

$$E_{Comb} = \dot{m}_{comb}.PCI_{comb} \quad (14)$$

Sendo,

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

PCI_{comb}: Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg).

No processo de queima de combustível para geração de energia, a relação entre a massa real de ar com a massa real estequiométrica necessária para a combustão completa do combustível (1+α) é de grande importância para a definição da combustão.

Quando essa relação é menor que 1, significa que há menos massa real de ar que o necessário para a combustão completa, o que acarreta em uma queima incompleta do combustível, sendo esse parcialmente liberado nos gases de exaustão. Essa situação configura um desperdício de energia, uma vez que parte do combustível ainda poderia ser queimado para produzir mais energia. Por outro lado, quando a relação entre a massa real de ar e a massa real estequiométrica para a combustão completa é maior que 1, caracteriza-se um cenário de excesso de ar, onde há perda de calor nos gases de exaustão.

Muitos autores assumem diferentes valores para o excesso de ar, como pode ser visto na Tabela *10*:

Tabela 10 - Percentuais de excesso de ar na combustão

Fonte	Excesso de ar (α)
[52]	0,07
[53]	0,2
[54]	0,3
[51]	0,4
[55]	0,5

Fonte: O autor

A equação geral da combustão é expressa por (15) [51].

$$C_xH_yO_zN_w + (1+\alpha)(mO_2 + nN_2) = aCO_2 + bH_2O + cO_2 + dN_2 \quad (15)$$

Sendo x, y, z, w, m, n, a, b, c e d os coeficientes lineares de balanço estequiométrico da equação e α o coeficiente de excesso de ar.

Segundo [51], a composição em volume e massa do ar é o apresentado na Tabela *11*.

Tabela 11 - Composição em volume e massa do ar

Componente	Volume (%)	Massa molar (g/mol)	Massa (%)
O_2	21	32,00	23,3
N_{2atm}	79	28,02	76,7
Total	100	28,86	100

Fonte: [51]

Segundo [56] e [57], a razão ar-combustível (R_{a-c}) apresenta a proporção teórica convencional que determinada especificação de combustível requer para a combustão a determinado coeficiente de excesso de ar. Ela é obtida pela Equação (16):

$$\frac{m_{ar}}{m_{comb}} = R_{a-c} \quad (16)$$

Sendo,

m_{ar} = massa molar de ar (g/mol);

m_{comb} = massa molar de combustível (g/mol).

Considerando a massa molar do ar e a composição do biogás apresentada, a razão ar-combustível é 1,12.

O modelo do motor de combustão interna (MCI) deve ser selecionado apenas após ser conhecido o fluxo mássico do biogás e seu potencial de energia, de modo a evitar a seleção de um MCI inadequado para o caso em questão.

A eficiência elétrica do CMG ($\eta_{el.CMG}$) quantifica a capacidade de transformação da energia do combustível em energia elétrica, e é calculada a partir da razão da energia produzida sobre a energia fornecida pelo combustível, Equação (17).

$$\eta_{el.CMG} = \frac{E_{el.ger}}{E_{comb}} \quad (17)$$

Sendo,

$E_{el.ger}$ = energia elétrica gerada (kWh);

E_{comb} = energia fornecida pelo combustível (kWh).

2.3.2 Análise Energética

Um dos métodos mais comuns usado para determinar o desempenho térmico de um processo é a análise energética baseada na conservação de massa e de energia. Para realizar essa análise é necessário se definir um Volume de Controle (VC): uma região do espaço com delimitações claramente definidas pelo qual ocorre um fluxo de massa.

A análise da conservação de massa do VC é representada pela Equação (18) [58].

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = 0 \quad (18)$$

Sendo $\dot{m}_e$ e $\dot{m}_s$, respectivamente, as vazões mássicas de entrada e de saída do VC.

A análise da conservação de energia é realizada a partir da Primeira Lei da Termodinâmica. 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 [59]. Aplicando a um VC, tem-se a Equação (19).

$$\Delta U = Q - W \quad (19)$$

Sendo,

ΔU = variação de energia interna;

Q = quantidade de calor trocada com o ambiente;

W = trabalho realizado.

Considerando desprezíveis as variações de energia cinética e potencial, a primeira lei da termodinâmica pode ser escrita na forma da Equação (20) [60].

$$Q_{VC} - W_{VC} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0 \quad (20)$$

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).

Deste modo, a análise energética permite o cálculo da quantidade de produtos obtidos, a partir das quantidades dos reagentes. Uma das limitações desse método é a falta de informação disponível sobre a degradação de energia que ocorre no processo e a quantidade de utilidade ou qualidade de calor contidos nos fluxos que saem do processo [61].

2.3.3 Análise Econômica

A análise econômica possui um papel fundamental no processo de dimensionamento de um sistema energético, pois, junto com a análise técnica, fornece informações necessárias para se tomar a decisão. Diversos são os indicadores que podem ser utilizados para análise de um investimento em energia, sendo os três mais comuns apresentados na Tabela *12* [62].

Tabela 12 - Indicadores Econômicos mais comuns para análise de investimento em energia

Posição	Indicador
1	Valor presente líquido (VPL)
2	Custo da energia
3	Custo de capital inicial do sistema

Fonte: [62]

O valor presente líquido é o indicador equivalente econômico do total do fluxo de caixa do investimento, trazido à valor presente. Isso significa que todos os lançamentos de caixa, sejam negativos ou positivos, são descontados no tempo a uma determinada taxa de juros. Desta forma, matematicamente, o VPL pode ser definido como visto na Equação (21) [63].

$$VPL = \sum_{j=0}^{n} R_j(1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^{n} C_j(1+i)^{-j} \qquad (21)$$

Sendo,

R_j = valor total das receitas no período j (US$);

C_j = valor total dos custos no período j (US$);

i = taxa de juros (% ao período);

j = período em que a receita ou custo ocorre;

n = número de períodos ou duração do projeto.

Desta forma, caso o projeto apresente VPL maior que zero (positivo), isso significa que o projeto é capaz de gerar valor econômico, sendo ele economicamente vantajoso. Por outro lado, caso o VPL seja menor que zero (negativo), significa que ele destrói valor econômico, não sendo interessante o investimento.

O VPL depende diretamente da taxa de juros a qual o projeto será descontado, como pode ser observado na Figura 10.

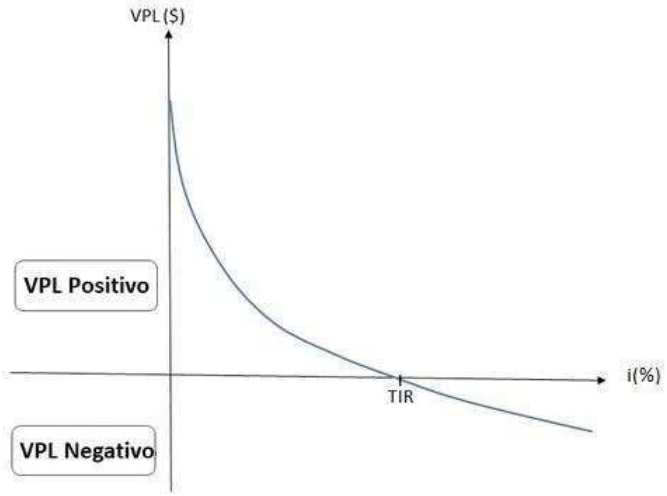


Figura 10 - Relação entre VPL e taxa de desconto (i)

Fonte: Adaptado de [64]

Quanto maior a taxa de juros (i), menor o VPL. Associado a esse conceito, têm-se o conceito de taxa interna de retorno (TIR). A TIR é a taxa de desconto a qual se aplicada ao projeto, torna seu VPL igual a zero. Desta forma, pode-se equacionar o problema de acordo com a Equação (22).

$$0 = \sum_{j=0}^{n} R_j(1+TIR)^{-j} - \sum_{j=0}^{n} C_j(1+TIR)^{-j} \qquad (22)$$

Segundo [65], um processo produtivo é considerado como um conjunto de subsistemas trocando massa e energia entre si e também com o ambiente, e pode ser representado por meio de fluxos contábeis. As equações de custos são as representações do balanço entre os fluxos contábeis de entrada e de saída do sistema, ou seja, o somatório dos fluxos contábeis de entrada no sistema é igual ao somatório dos fluxos de saída do sistema.

Os fluxos contábeis são entendidos como aqueles que saem do sistema e possuem utilidades, assim como aqueles que entram no sistema e trazem custos associados. Os processos podem ou não ter fluxos não contábeis, quando o insumo ou a saída do processo não possui valor agregado, como por exemplo ar usado na combustão quando ele é aspirado diretamente da atmosfera sem custo, ou gases de exaustão na saída de um motor a combustão quando são jogados diretamente na atmosfera sem nenhum tratamento ou custo ambiental.

De modo geral, se representa o fluxo de custos em um sistema geral como

apresentado na Equação (23):

$$\sum_{i=1}^{n} C_{ei} + \frac{Z}{h} = \sum_{j=1}^{m} C_{sj} \quad (23)$$

Sendo:

C_{ei}: fluxo de custos de entrada no sistema (US$/h);

Z: investimento anualizado do processo (US$);

h:tempo de operação do processo no ano (h);

C_{ei}: fluxo de custos de saída do sistema (US$/h).

O fluxo contábil pode ainda ser representado conforme a Equação (24):

$$C_i = 3600.\, c_i \dot{m}_i \quad (24)$$

Sendo:

C_i: fluxo contábil i do sistema (US$/h);

c_i: custo associado ao fluxo de i do sistema (US$/kg);

m_i: fluxo de massa de entrada i no sistema (kg/s).

Conforme apresentado na Equação (24), o coeficiente 3.600 serve para a conversão temporal de segundos para horas, uma vez que o fluxo de massa de entrada no sistema é expresso em segundos e o fluxo contábil de saída em horas.

O custo de capital inicial do sistema (CC) é o total de investimentos necessários para implantação do empreendimento, como a aquisição de equipamentos e gastos com obras.

$$CC = \sum Investimentos \quad (25)$$

Existem ainda outros indicadores econômicos que auxiliam a tomada de decisão sobre determinado investimento como por exemplo, o *payback*.

Payback é o indicador econômico que representa o tempo decorrido desde o investimento inicial até a recuperação econômica do montante investido. Em outras palavras, é o período de tempo necessário para que o VPL seja zero.

O investimento de um motor de combustão interna (MCI) varia em função da capacidade nominal do mesmo, conforme pode ser observado na Tabela 13.

Tabela 13 - Custo de instalação MCI x Capacidade

Capacidade nominal	Valor de Instalação (US$/kW)
100 kW	1.071,43
300 kW	800,00
1.000 kW	750,00
3.000 kW	425,00
5.000 kW	694,64

Fonte: [66]

Segundo [67], o custo anual equivalente (ou custo anualizado) se relaciona com o investimento como visto na Equação (26).

$$INV = CAE.\left[\frac{(1+k)^n-1}{(1+k)^n.k}\right] \quad (26)$$

Sendo,

INV: valor total do investimento (US$);

CAE: custo anual equivalente (US$);

k: custo de capital considerado no projeto (% a.a.);

n: vida útil do equipamento (anos).

Segundo [68], o cálculo do custo da energia elétrica para um sistema a biogás considera o custo total do projeto, incorporando custos diretos (câmara de combustão e MCI), custo do biogás e custos de manutenção e operação do sistema, conforme Equação (27).

$$C_{elB} = \left[\frac{I_{pb}.f}{H.E_p}\right] + \left(\frac{C_{biogas}.E_{comb}}{E_p}\right) + C_{manB} \quad (27)$$

Sendo,

I_{pb} – Investimento da planta de biogás (US$);

f = fator de anuidade baseado na taxa de juros;

H = período equivalente de utilização (horas/ano);

C_{biogas} = custo do biogás (US$/kWh);

E_{comb} = energia do combustível (kWh);
E_p = energia produzida (kWh);
C_{manB} = custo de manutenção do subsistema a biogás (US$/kWh).

O fator de anuidade é obtido pelas Equações (28) e (29) [69].

$$f = \frac{q^k(q-1)}{q^k-1} \quad (28)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (29)$$

Sendo,

f: fator de anuidade;
k: período de amortização (anos);
r: taxa de juros anual (% a.a.).

Do mesmo modo, o custo da energia elétrica produzida no sistema solar utiliza o custo total do projeto incorporando custos diretos e indiretos (custos de engenharia e construção), conforme Equação (30).

$$C_{elS} = \left[\frac{I_{ps}.f}{H.E_p}\right] + C_{manS} \quad (30)$$

Sendo,
I_{pb} – Investimento da planta solar (US$);
f = fator de anuidade baseado na taxa de juros;
H = período equivalente de utilização (horas/ano);
E_p = energia produzida (kWh);
C_{manS} = custo de manutenção do subsistema solar (US$/kWh).

O custo da eletricidade no sistema híbrido é então calculado a partir das Equações (31) a (33).

$$C_{elSH} = C_{elB}.FP_B + C_{elS}.FP_S \quad (31)$$

$$FP_B = \frac{E_{pB}}{E_{pB}+E_{pS}} \quad (32)$$

$$FP_S = \frac{E_{pS}}{E_{pB}+E_{pS}} \quad (33)$$

Sendo;

FP_B = fator de ponderação do subsistema a biogás;

FP_S = fator de ponderação do subsistema solar fotovoltaico;

E_{pB} = energia produzida pelo subsistema a biogás (kWh);

E_{pS} = energia produzida pelo subsistema solar fotovoltaico (kWh).

O cálculo das receitas anuais é necessário para o cálculo dos indicadores econômicos de valor presente líquido (VPL) e *payback*. A receita dos subsistemas é calculada a partir das Equações (34) e (35) [68].

$$R_B = E_{pB}.H_B.(C_{el} - C_{elB}) \quad (34)$$

$$R_S = E_{pS}.H_S.(C_{el} - C_{elS}) \quad (35)$$

Sendo,

RB = receita anual do subsistema a biogás (US$/ano);

RS = receita anual do subsistema solar (US$/ano);

HB = período equivalente de utilização do subsistema a biogás (horas/ano);

HS = período equivalente de utilização do subsistema solar fotovoltaico (horas/ano);

Cel = tarifa da eletricidade da concessionária (US$/kWh);

CelB = custo da energia elétrica produzida no subsistema a biogás (US$/kWh);

CelS = custo da energia elétrica produzida no subsistema solar fotovoltaico (US$/kWh).

2.3.4 Demanda energética de uma comunidade

A demanda energética de uma comunidade (D_{el}) é dada em função da demanda per capita por energia e pelo número de habitantes, conforme Equação (36).

$$D_{el} = N_{hab}.C_{per\ capita} \quad (36)$$

Sendo,

N_{hab} = número de habitantes da região (hab.);

$C_{per\ capita}$ = consumo per capita de eletricidade (kWh/hab).

3 Resultados e Discussões

No presente capítulo, após a delimitação da área da pesquisa realizada na introdução, serão apresentados o local a ser estudado e a modelagem do sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico. A partir da definição do modelo a ser estudado, são realizadas as simulações e análises energética e econômica do sistema híbrido, assim como é calculada a eficiência energética do processo

3.1 Guarapuava/PR

Guarapuava é um município localizado no centro-sul do estado do Paraná (Figura *11*), região Sul do Brasil [70], e possui população estimada de mais de 180 mil habitantes [71].

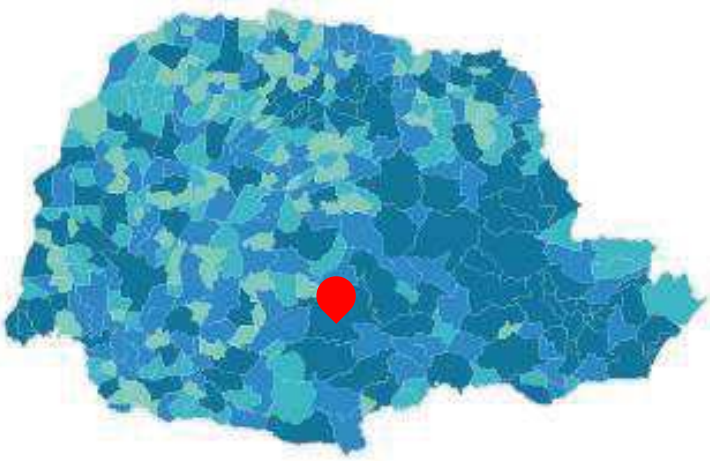
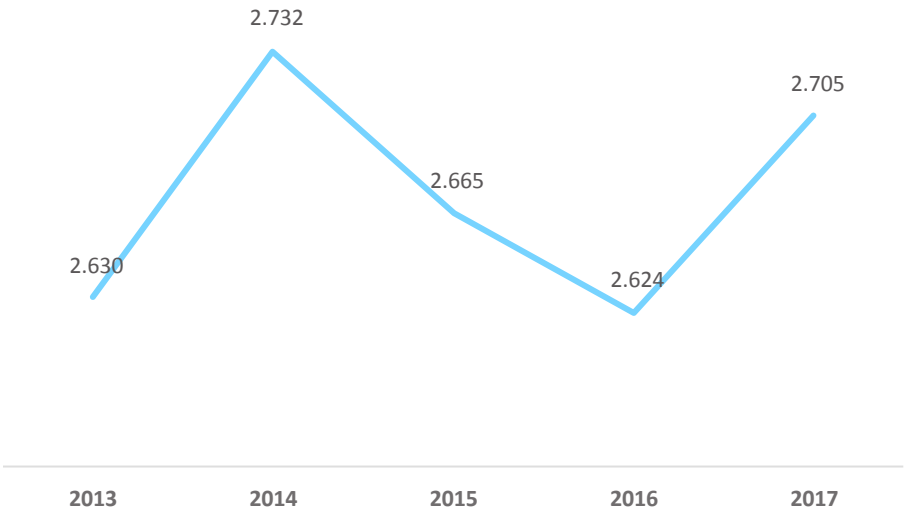


Figura 11 – Município de Guarapuava/PR
Fonte: Adaptado de IBGE Cidades (disponível em https://cidades.ibge.gov.br/- Acessado em 06/03/2019)

Segundo [72], o consumo per capita de energia elétrica do estado do Paraná não apresenta uma trajetória apenas crescente. Nos anos de 2015 e 2016, o consumo per capita apresentou queda.

Gráfico 2 - Consumo per capita de energia elétrica no estado do Paraná (kWh/hab)



Fonte: O autor, a partir de [72]

Segundo [73], a população do município de Guarapuava, em 2020, será 179.694 habitantes. Considerando em 2020 o consumo per capita de energia elétrica no estado do Paraná sendo o mesmo de 2017, 2.075 kWh/hab, e o ano possuindo 8.760 horas, utilizando a equação (36), a demanda energética de Guarapuava seria 55,49 MW no ano.

Em se tratando de sistemas híbridos, diversas são as configurações para a geração de energia elétrica. Conforme apresentado na

Tabela *14*, muitos autores ([74] a [75]) assumem diferentes valores de distribuição de energia produzida a partir do biogás e dos painéis FV.

Tabela 14 - Percentual de geração de energia a partir do biogás e de painéis FV em sistemas híbridos

Fonte	Energia gerada a partir de biogás (%)	Energia gerada a partir de painéis FV (%)
[74]	26,44	73,56
[76]	15,00	85,00
[77]	25,28	74,72
[78]	17,17	82,83
[79]	78,13	21,88
[75]	51,28	48,72
Média	35,55	64,45

Fonte: O autor

A partir da comparação entre a distribuição percentual da energia produzida pelos painéis FV e a partir do biogás, percebe-se que há predomínio da geração de energia elétrica a partir dos painéis solares. Apesar das diferentes metodologias em cada estudo para a estimação da quantidade de energia gerada por cada fonte, a média de geração de energia nos permite identificar de modo simplificado o padrão de distribuição encontrado nos sistemas estudados, desconsiderando as diferenças metodológicas e particularidades das regiões.

Segundo [5], a geração de RSU per capita na região Sul do Brasil em 2017 foi

0,757 kg/hab/dia, um aumento de 0,66 % frente ao resultado de 2016 (0,0752 kg/hab/dia). Considerando esse crescimento linear, pode-se estimar que em 2020 a geração per capita de RSU na região Sul do Brasil será 0,772 kg/hab/dia.

Desta forma, pode-se estimar a quantidade de RSU produzida em Guarapuava pela Equação (37).

$$Q_{RSU} = \frac{G_{RSU} * P}{1.000} \quad (37)$$

Sendo,

Q_{RSU}: Quantidade de RSU gerado (t/dia);

G_{RSU}: Geração de RSU (kg/hab/dia);

P: População (hab).

Utilizando a equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(37), pode-se estimar que em 2020 a geração de RSU de Guarapuava será 138,75 t/dia.

O aterro municipal de Guarapuava (Figura *12*) recebe os resíduos sólidos aproximadamente na composição listada na Tabela *15*.

Tabela 15 - Composição do RSU de Guarapuava

Categoria	Fração
Resíduos Orgânicos	40%
Recicláveis	38%
Rejeito	22%

Fonte: [80]



Figura 12 –Aterro Municipal de Guarapuava/PR
Fonte: [70]

Segundo [81], a razão peso-volume de RSU é 159,09 kg/m³. Considerando que o dia possui 86.400 segundos, tem-se os fluxos mássicos de RSU por categoria listados na Tabela *16*.

Tabela 16– Fluxo mássico do RSU de Guarapuava

Categoria	Fluxo de RSU (m³/dia)	Fluxo de RSU (kg/s)
Resíduos Orgânicos	348,88	0,6424
Recicláveis	331,44	0,6103
Rejeito	191,88	0,3533

Fonte: O autor

3.2 Modelagem do sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico

O fluxograma proposto do processo de geração de energia (Figura *13*) é composto por duas fontes geradoras de eletricidade: a combustão do biogás e a captação da radiação solar.

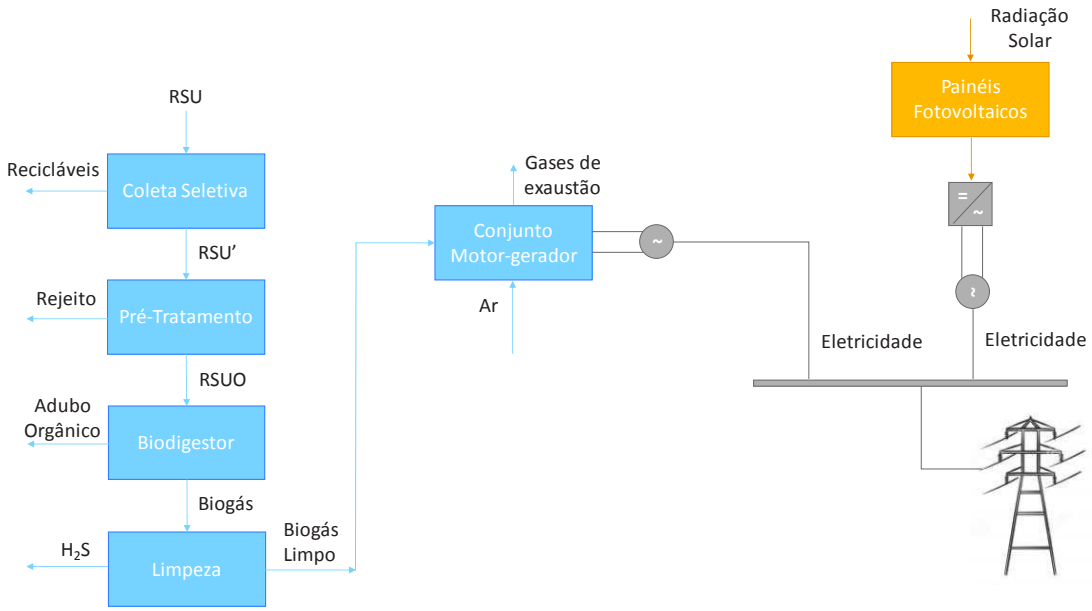


Figura 13 – Fluxo do processo: sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico

Fonte: Autoria Própria

Esse fluxo é composto por seis etapas: coleta seletiva, pré-tratamento, biodigestor, limpeza, motor-gerador e painéis solares fotovoltaicos.

A coleta seletiva corresponde ao processo de separação primária dos resíduos urbanos coletados, de onde são separados os compostos recicláveis. Os demais resíduos (sem os recicláveis) passam por um processo de pré-tratamento, no qual são separados os rejeitos, que é a parcela dos resíduos sólidos que não podem ser aproveitados no processo. Nessa etapa, os resíduos, já sem os recicláveis, são separados entre a parcela de resíduos sólidos urbanos orgânicos (RSUO) e rejeito.

Os resíduos sólidos urbanos orgânicos são admitidos pelo biodigestor, no qual ocorre o processo de digestão anaeróbia. Como saída, tem-se o adubo orgânico e o biogás. Esse biogás, para ser utilizado em motores de combustão interna, precisa passar por um processo de limpeza, de modo a remover seus contaminantes que podem danificar os motores. Como simplificação deste processo, foi selecionado que o contaminante estudado é o H_2S, que será removido nesse processo de limpeza. O

biogás limpo é então queimado no motor-gerador, de modo a gerar eletricidade.

No módulo de geração de energia solar, a radiação solar é captada por meio de painéis solares fotovoltaicos para geração de eletricidade.

3.3 Resultados da Análise Energética

Para o processo proposto no preste estudo (Figura *13*), pode-se estabelecer seis volumes de controle: coleta seletiva (VC 1), pré-tratamento (VC 2), biodigestão (VC 3), limpeza (VC 4), motor de combustão interna (VC 5) e conjunto de painéis fotovoltaicos (VC 6), conforme apresentado na Figura *14*. Neste estudo, foi optado pela análise dos volumes de controle individuais, de modo a facilitar a análise de todas as etapas do processo.

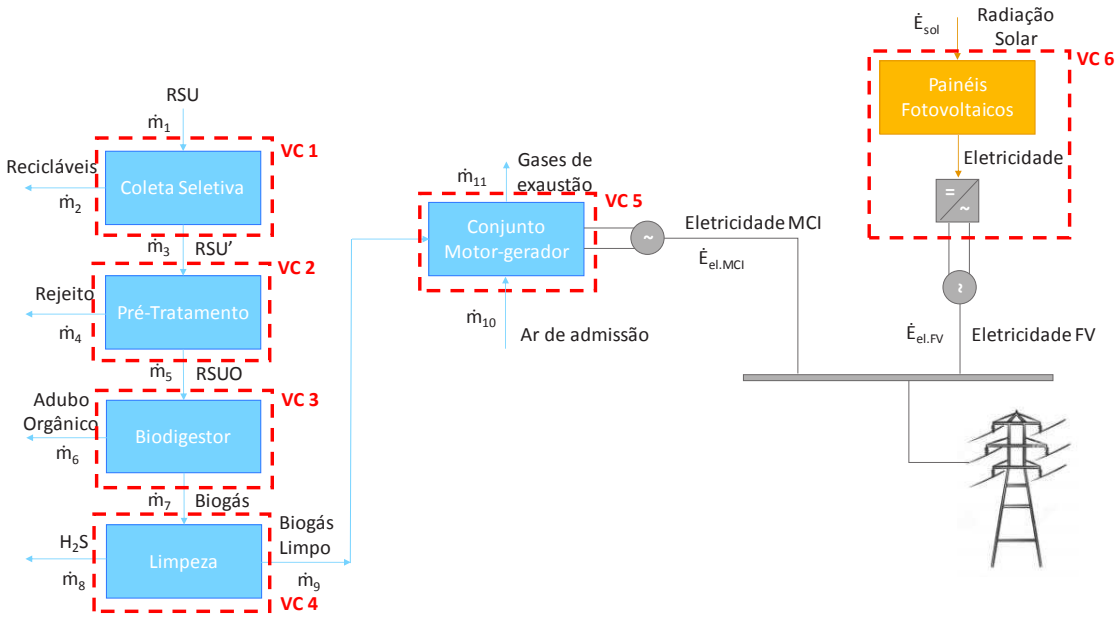


Figura 14 – Separação dos volumes de controle no Processo

Fonte: O autor

As equações decorrentes das equações do balanço de massa (18) e energia (20) nos seis volumes de controle estabelecidos, bem como considerando a razão ar-combustível no conjunto motor-gerador são apresentadas nas Equações (38) a (49).

Os pontos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 são fluxos de RSU, recicláveis, RSU' (RSU após a coleta seletiva), rejeitos, RSUO (RSU orgânico), adubo orgânico, biogás, H_2S, biogás limpo (após a remoção de H_2S,), ar de admissão e gases de exaustão,

respectivamente.

3.3.1 Volume de Controle 1: Coleta Seletiva

O primeiro volume de controle é o processo de coleta seletiva. Nesse processo, os materiais recicláveis são separados do RSU para sofrerem o processo de reciclagem. O processo de reciclagem não será abordado por este estudo.

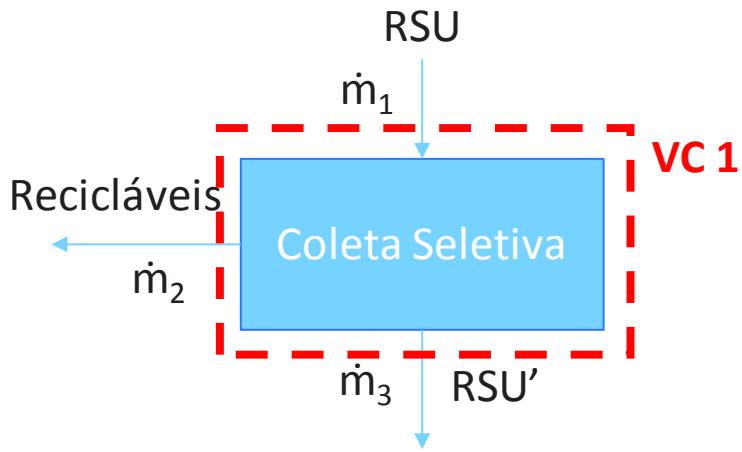


Figura 15 – Volume de Controle 1: Coleta Seletiva

Fonte: O autor

Considerando as Equações (18) e (20), as equações para esse volume de controle são representadas pelas Equações (38) e (39).

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (38)$$

$$h_1\dot{m}_1 = h_2\dot{m}_2 + h_3\dot{m}_3 \quad (39)$$

Conforme apresentado na Tabela *16*, fluxo mássico dos RSU recolhidos para o Aterro Municipal de Guarapuava é 1,6060 kg/s ($\dot{m}_1$) e dos recicláveis, 0,6103 kg/s ($\dot{m}_2$). Desta forma, a partir da Equação (38), obtêm-se o fluxo mássico dos RSU sem os recicláveis (RSU'), que é 0,9957 kg/s.

Para o cálculo do poder calorífico inferior do RSU, obteve-se os percentuais de materiais recicláveis compostos do RSU de Guarapuava em [82], com os respectivos valores do poder calorífico inferior (PCI) [61].

Tabela 17 – Composição dos recicláveis de Guarapuava

Categoria	Fração	PCI da fração (kcal/kg)
Papel/papelão	58 %	3.780
Plástico	23 %	7.830
Metais	10 %	0
Vidro	9 %	48

Fonte: Adaptado a partir de [82] e [61]

A partir da Tabela *17*, é possível se obter o valor de 16.726,04 kJ/kg para o PCI dos recicláveis de Guarapuava (h_2). Logo, a partir de (39), obtêm-se o valor do PCI dos RSU de Guarapuava após a remoção dos recicláveis: 11.906,02 kJ/kcal (h_3).

3.3.2 Volume de Controle 2: Pré-Tratamento

O Segundo volume de controle a ser analisado é o pré-tratamento.

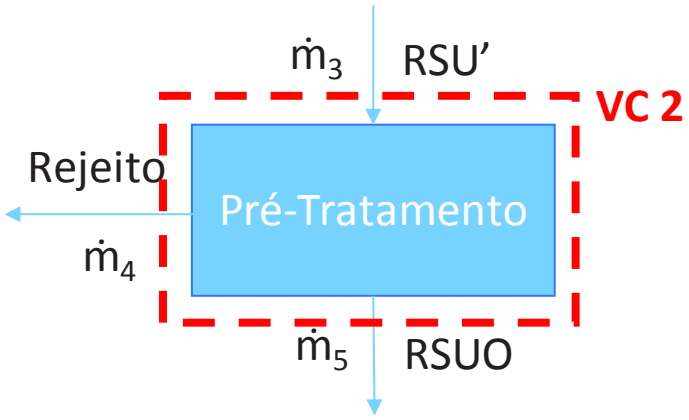


Figura 16 - Volume de Controle 2: Pré-Tratamento

Fonte: O autor

Considerando as Equações (18) e (20), as equações para esse volume de controle são representadas pelas Equações (40) e (41).

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 \qquad (40)$$

$$h_3\dot{m}_3 = h_4\dot{m}_4 + h_5\dot{m}_5 \qquad (41)$$

Conforme apresentado na Tabela *16*, o fluxo mássico do rejeito é 0,3533 kg/s ($\dot{m}_4$) e dos RSU sem os recicláveis (RSU'), é 0,9957 kg/s ($\dot{m}_3$). Desta forma, a partir da Equação (40), o fluxo mássico do resíduo sólido orgânico (RSUO) é 0,6424 kg/s ($\dot{m}_4$).

Segundo [61], o poder calorífico inferior do rejeito é 2.075 kcal/kg (h_4) Sendo assim, a partir da Equação (41), o poder calorífico inferior do RSUO de Guarapuava é 13.679,34 kJ/kg (h_5).

3.3.3 Volume de Controle 3: Biodigestão

O terceiro volume de controle é o processo de biodigestão (Figura *17*).

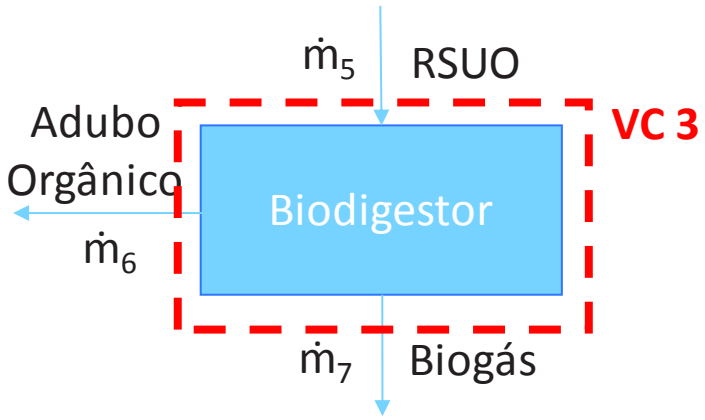


Figura 17 - Volume de Controle 3: Biodigestão

Fonte: O autor

A tecnologia de biodigestão considerada neste estudo foi da Kompogas Suíça e sua representante Kuttner do Brasil Ltda. Segundo [83], a razão de produção de biogás a partir dos resíduos sólidos orgânicos é 92,31, produzindo um biogás com 58 % de CH_4 e 42 % de CO_2. Desta forma, o volume de 348,88 m³/dia de RSUO gera 32.204,47 Nm³/dia de biogás, considerando como temperatura ambiente 25 ºC e pressão 101,3 kPa. O PCI do biogás foi considerado 15.429 kJ/kg (h_7) [84].

Considerando a densidade do biogás como 1,15 kg/m³ [85], obtêm-se a vazão mássica de 0,4286 m³/s de biogás ($\dot{m}_7$).

Considerando as Equações (18) e (20), as equações para esse volume de controle são representadas pelas Equações (42) e (43).

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 + \dot{m}_7 \quad (42)$$

$$h_5\dot{m}_5 = h_6\dot{m}_6 + h_7\dot{m}_7 \quad (43)$$

A partir da Equação (42), obtêm-se a vazão mássica de adubo orgânico ($\dot{m}_6$): 0,2138 m³/s; e, a partir da Equação (43), o seu PCI: 10.170,78 kJ/kg (h6).

3.3.4 Volume de Controle 4: Limpeza

Conforme já abordado no capítulo 1.3 (Características do Biogás), o biogás possui ainda em sua mistura uma série de impurezas, que podem causar diversos impactos dependendo de sua concentração e combinação. Segundo a tecnologia empregada (biodigestor Kompogas Suíça/Kuttner do Brasil Ltda), o contaminante presente no biogás gerado é o sulfeto de hidrogênio [86], H_2S, conhecido também como gás sulfídrico. Desta forma, devido a suas propriedades corrosivas e tóxicas, esse gás deve ser removido do biogás, antes do mesmo ser transferido para o conjunto motor-gerador.

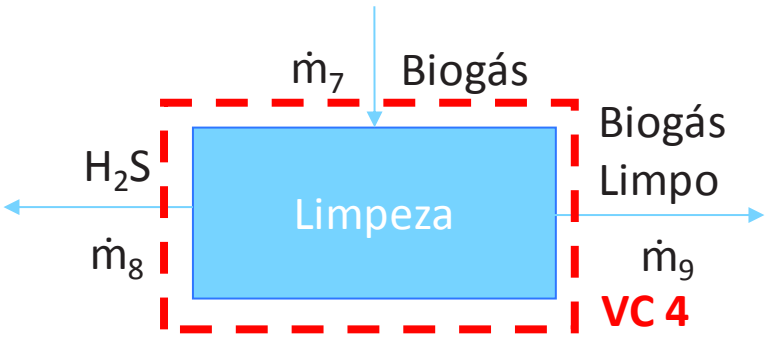


Figura 18 - Volume de Controle 4: Limpeza

Fonte: O autor

Considerando as Equações (18) e (20), as equações para esse volume de controle são representadas pelas Equações (44) e (45).

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 + \dot{m}_9 \quad (44)$$

$$h_7\dot{m}_7 = h_8\dot{m}_8 + h_9\dot{m}_9 \quad (45)$$

Uma vez que o biodigestor gera 23.208,79 Nm³/dia de biogás, 200 ppm corresponde à concentração de H_2S no biogás para o volume de 4,64 Nm³/dia de H_2S. Considerando a massa molecular do H_2S como 34,1 g/mol e sua concentração de 200 ppm no biogás, é obtida a densidade do gás sulfídrico: 278,12 mg/m³ [87]. Sendo assim, o processo de limpeza remove 1,79 kg/dia de H_2S, o que corresponde a $2{,}07.10^{-5}$ kg/s ($\dot{m}_8$).

A partir da Equação (44), obtêm-se 0,4286 kg/s como a vazão mássica do biogás limpo ($\dot{m}_9$), sem os traços contaminantes do gás sulfídrico.

Segundo [88], o PCI do H_2S é 15.192 kJ/kg (h_8). Logo, por meio da Equação (45), obtêm-se o PCI do biogás limpo: 15.429 kJ/kg (h_9).

3.3.5 Volume de Controle 5: Conjunto Motor-gerador

Adotando a composição do ar como 21 % de O_2 e 79 % de CO_2, a composição do biogás como 58 % de CH_4 e 42 % de CO_2 [83] e o excesso de ar como 40 % [51], tem-se a equação estequiométrica da combustão em questão, Equação (46).

$$0{,}58.CH_4 + 0{,}42.CO_2 + 1{,}4(1{,}24.O_2 + 4{,}662.N_2) = a.CO_2 + bH_2O + cO_2 + dN_2 \quad (46)$$

Realizando o balanço estequiométrico, tem-se o sistema de equações que, se resolvidas em função da composição do ar, do combustível, e da taxa de excesso de ar, obtêm-se a reação de combustão específica para o processo proposto, Equação (47).

Carbono:	$0{,}58 + 0{,}42 = a$	
Hidrogênio:	$4.0{,}58 = 2b$	
Oxigênio:	$2.0{,}42 + 1{,}4.1{,}24.2 = 2a + b + 2c$	(47)
Nitrogênio:	$1{,}4.4{,}662.2 = 2d$	

Resolvendo esse sistema equações pelo método da substituição, obtêm-se:

a = 1
b=1,16
c= 0,58
d = 6,53

Desta forma, pode-se reescrever a equação geral da combustão para o caso e características estudadas, Equação (48).

$$0{,}58.CH_4 + 0{,}42.CO_2 + 1{,}74.0_2 + 6{,}53.N_2 = CO_2 + 1{,}16.H_2O + 0{,}58.O_2 + 6{,}53.N_2 \quad (48)$$

A composição dos gases provenientes da combustão é apresentada na Tabela *18*.

Tabela 18 - Percentual de composição dos gases da combustão

Componente	Massa molar (g/mol)	Composição de massa (%)
CO_2	44,01	16,44
H_20	18,02	8,35
O_2	32,00	6,93
N_2	28,01	68,29

Fonte: O autor

O fluxo mássico de biogás que chega no CMG ($\dot{m}_9$) é 0,4286 kg/s. Considerando que o PCI desse biogás (h_9) é 15.429,01 kJ/kg, o potencial energético do biogás que chega ao MCI é de 6,6 MW. Com isso, foi selecionado para o processo o CMG modelo CG260-12 50 Hz da Caterpillar, cujas especificações, operando com biogás, são apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**Tabela *19*.

Tabela 19 -Especificações do CMG CG260-12 (50Hz) operando com biogás

	Valor
Potência elétrica	2.830 kW
Pressão efetiva	1.700 kPa
Temperatura de exaustão	150 °C
Eficiência elétrica	42,3 %
Eficiência térmica	40,8 %
Eficiência total	83,1 %

Fonte: [89]

Selecionado o modelo do CMG, o VC 5 é apresentado na Figura *19*.**Erro! Fonte de referência não encontrada.**

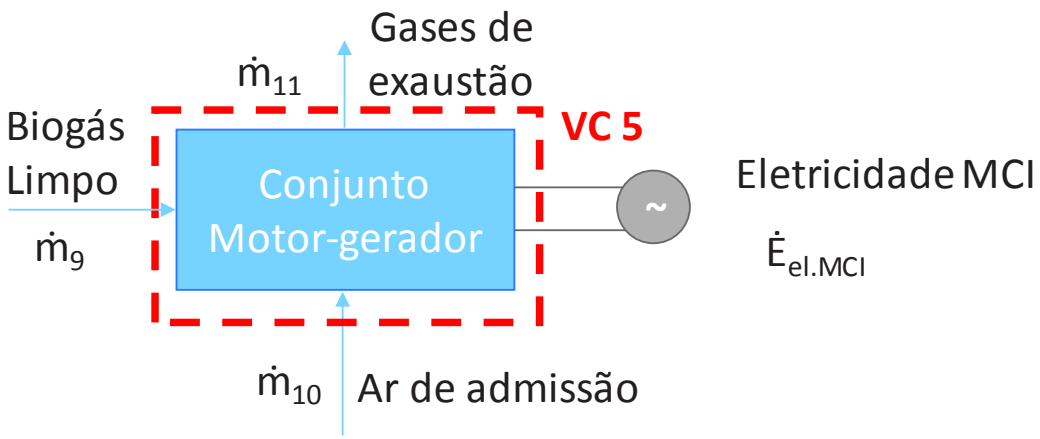


Figura 19 - Volume de Controle 5: Motor-gerador

Fonte: O autor

Utilizando a eficiência elétrica do CMG selecionado e a energia disponível do biogás que chega ao CMG, por meio da Equação (17), obtêm-se a geração de potência elétrica de 2.797,42 kW.

3.3.6 Volume de Controle 6: Conjunto de painéis fotovoltaicos

O último volume de controle analisado é o conjunto de painéis fotovoltaicos. Nesse VC não há fluxo de massa, apenas de energia. Desta forma, toda a energia que entra no sistema é igual à energia que sai dele, seja na forma de energia elétrica ou na forma de perdas, sendo essa quantificada por meio da eficiência dos painéis FV.

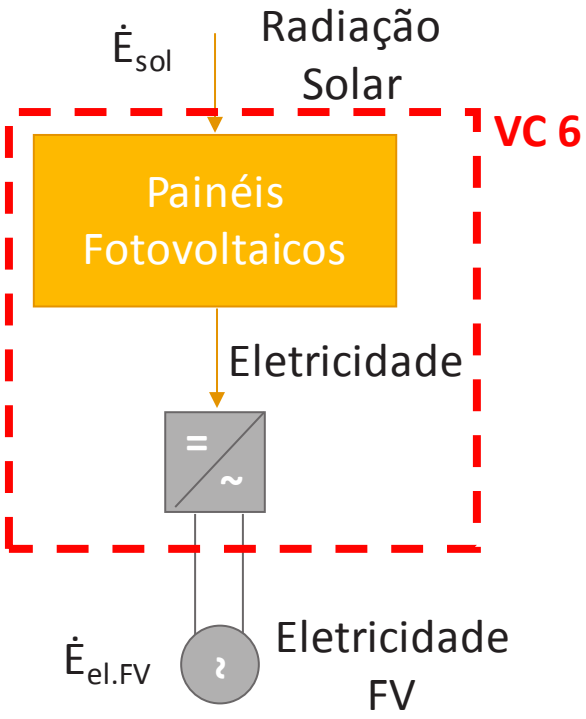
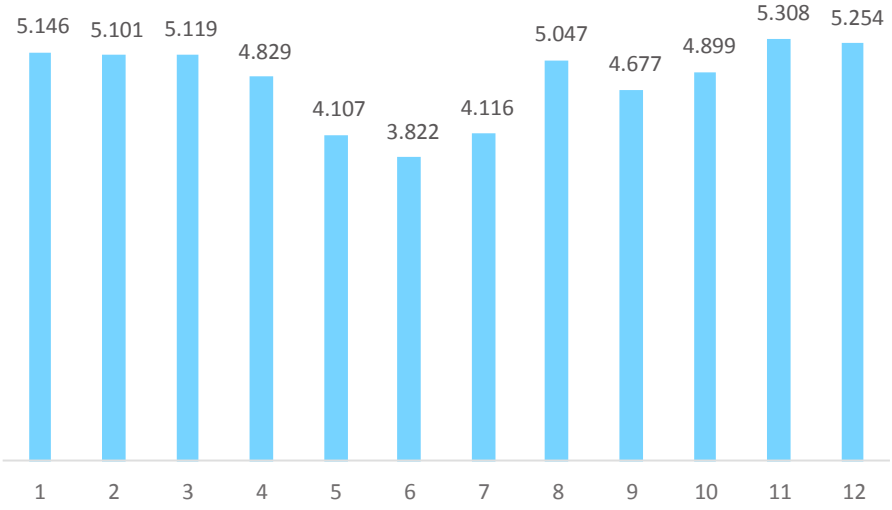


Figura 20 - Volume de Controle 6: Conjunto de painéis fotovoltaicos

Fonte: O autor

A distribuição da irradiação solar na região de Guarapuava é apresentada no **Erro! Fonte de referência não encontrada.**Gráfico 3. A média anual de irradiação solar é 4.786 Wh/m².

Gráfico 3 - Média mensal da irradiação solar no plano inclinado (Wh/m²)



Fonte: O autor, a partir de [90]

A geração de energia solar FV depende de número de painéis instalados: Quanto maior o número de painéis, mais energia solar FV é convertida. De modo a se obter uma geração de energia elétrica a partir do conjunto solar FV adequado, foi utilizada a ponderação de geração em comparação à geração de energia a partir do biogás. A proporção adotada para o presente estudo foi: 35,55 % da energia elétrica gerada seria a partir do biogás e 64,45 % através dos painéis FV. Sabendo, então, que a geração de potência elétrica por meio do biogás é 2.797,42 kW no ano, a conversão dos painéis solares FV deve ser aproximadamente 5.071,62 kW no ano.

As especificações adotadas para o painel no presente estudo são apresentadas na Tabela *20*.**Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 20 - Especificações do painel FV

	Valor
Tipo de módulo	Silício monocristalino
η_r (%)	13
β (%/ºC)	0,40
NOCT (ºC)	45
T_r (ºC)	25
A (m²)	1,08

Fonte: [28]

Utilizando a Equação (11) e a média anual de irradiância solar no plano inclinado, verifica-se que serão necessários 36.123 painéis solares FV para suprir a carga estimada para o subsistema solar FV, o que demandará uma área útil de 39.012,84 m² para a instalação dos painéis.

3.3.7 Eficiência Energética

A partir das informações energéticas do processo proposto, A eficiência energética pode ser definida a partir da relação entre energia de entrada e saída de um sistema. Segundo [91], a eficiência energética pode ser obtida pela equação:

$$\eta = \frac{\sum E_{saída}}{\sum E_{consumo}} \quad (49)$$

Sendo,

η = Eficiência energética;

$\sum E_{saída}$ = Total de potência que sai do sistema (kW);

$\sum E_{consumo}$ = Total de potência consumida pelo sistema (kW).

Para o cálculo da eficiência energética do sistema proposto, foram selecionados os fluxos de entrada que efetivamente contribuem para a geração de eletricidade. Na Figura 21 é possível observar os fluxos selecionados: biogás limpo, radiação solar e eletricidade gerada pelo motor-gerador e pelos painéis solares-fotovoltaicos.

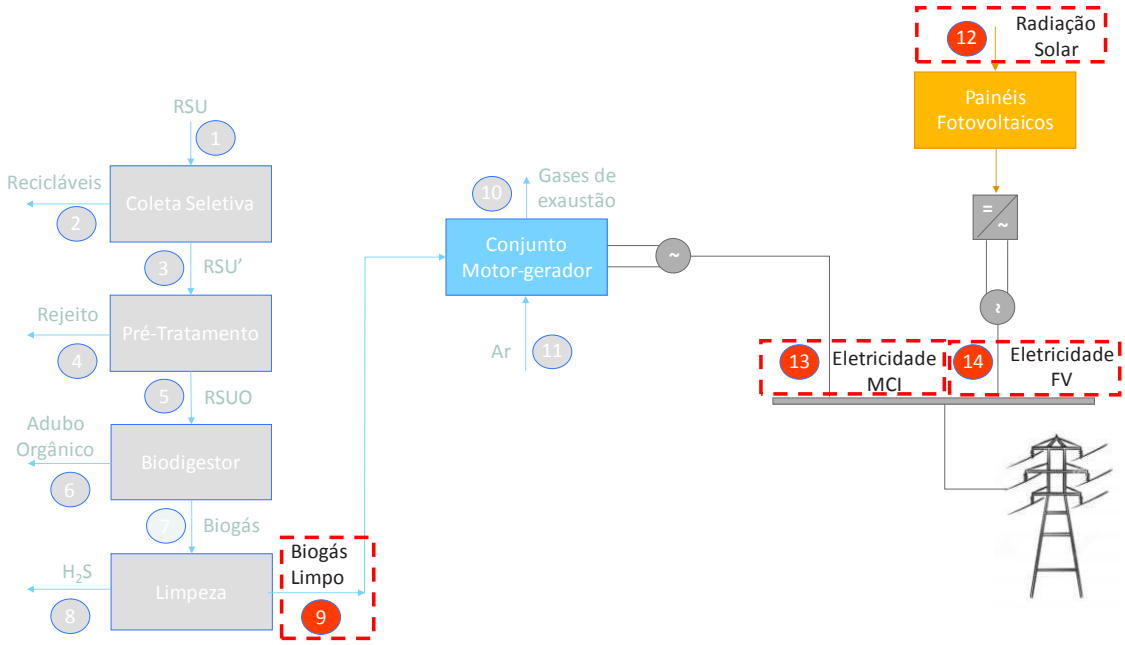


Figura 21 - Seleção dos processos para cálculo da eficiência energética

Fonte: O autor

De todo o processo apresentado, foram excluídas as etapas de coleta seletiva, pré-tratamento, biodigestor e limpeza para o cálculo da eficiência energética. Desta forma, tem-se como entradas do sistema, o biogás limpo admitido pelo CMG e radiação solar incidente nos painéis solares-fotovoltaicos. Como saídas do sistema tem-se a eletricidade produzida pelo motor-gerador e a gerada pelos painéis solares FV.

Pode-se agrupar todas essas etapas e analisá-las como um único processo, entendido como a “Planta Biogás & FV” (Figura 22).



Figura 22 - Planta Biogás & FV

Fonte: O autor

Utilizando a Equação (49)**Erro! Fonte de referência não encontrada.** na "Planta Biogás & FV", obtêm-se a Equação (50) para o cálculo da eficiência energética da geração solar fotovoltaica:

$$\eta = \frac{E_{el.CMG} + E_{el.PV}}{E_{biogás\ limpo} + E_{Radiação\ Solar}} \qquad (\ 50\ )$$

Sendo,

η = Eficiência energética da planta proposta;

$E_{El.CMG}$ = Potência gerada pelo CMG (kW);

$E_{El.FV}$ = Potência convertida pelos painéis FV (kW);

$E_{biogás\ limpo}$ = Potência do biogás limpo (kW);

$E_{Radiação\ Solar}$ = Potência da radiação solar (kW).

Utilizando a Equação (50), obtêm-se a eficiência energética de 17,21 % para o processo proposto no presente estudo.

3.4 Resultados da Análise Econômica

3.4.1 Premissas da análise

A cotação do dólar comercial considerada para conversão dos custos no presente estudo foi 3,7739 R$/US$ [92], referente ao câmbio no dia 20/07/2018. O investimento total do biodigestor Kompogas com sistema de remoção de H_2S considerado é de US$ 6.944.342,46 [93].

Considerando a capacidade nominal do CMG selecionado, seu custo de investimento é US$ 1.202.750,00 [68] e de operação e manutenção é 0,0080 US$/kWh [68]. Considerando a potência fornecida pelo conjunto de painéis solares FV, o custo dos painéis é US$ 10.143.239,81 [99], e o custo de operação e manutenção 0,0011 US$/kWh [99].

A tarifa de eletricidade da concessionária local de Guarapuava é 0,1322 US$/kWh [94]. O regime de operação do subsistema a biogás é 8.760 h, uma vez que a instalação escolhida permite o funcionamento ininterrupto de 24 horas/dia de modo automático no modo supervisório instalado na sala de controle [93].Já o regime de operação dos painéis solares fotovoltaicos é 1.747 h/ano, considerando o número médio de HSP na região de Guarapuava [90].

Desta forma, o investimento total do sistema proposto (INV_T) é dado pela Equação (51).

$$INV_T = INV_{Bio} + INV_{CMG} + INV_{FV} \quad (51)$$

Sendo,

INV_{Bio} = Investimento do biodigestor com sistema de remoção de H_2S (US$);

INV_{CMG} = Investimento do conjunto motor-gerador a biogás (US$);

INV_{FV} = Investimento do conjunto de painéis solares FV (US$).

Logo, o investimento total do sistema proposto é US$ 18.290.332,26.

3.4.2 Fluxos de Custo

Segundo [95], o custo da coleta do resíduo sólido urbano é 150 R$/t. Utilizando a cotação do dólar comercial como 3,7739 R$/US$ [92], isto equivale a um custo de 39,75 US$/t de RSU. De acordo com [96], o custo da coleta seletiva é 82 R$/t, o que corresponde a um custo de 21,73 US$/t.

Da análise do processo de biogás (Figura *13*), é possível separar três processos: Coleta Seletiva, Pré-Tratamento e a Solução Kompogas.

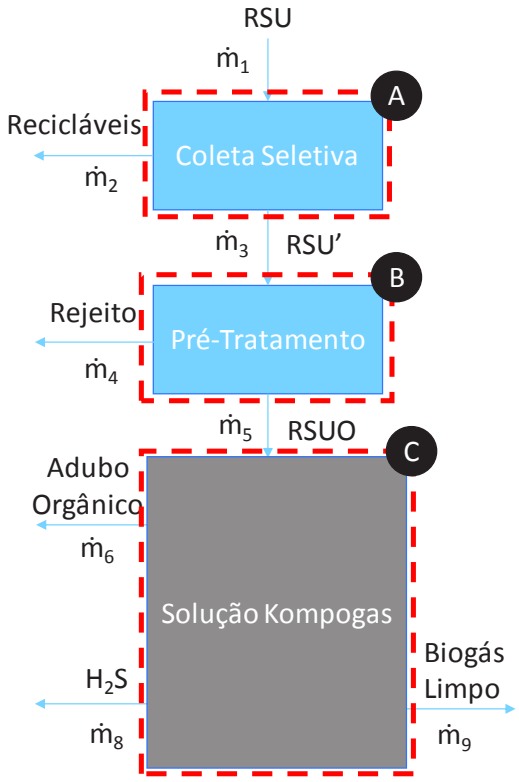


Figura 23 – Fluxos de custo para produção de Biogás

Fonte: O autor

De modo a simplificar o problema, foi adotado que os custos da coleta do resíduo sólido urbano e o custo da coleta seletiva já incorporam o valor de investimento de seus subprocessos. Os fluxos de H_2S e rejeito foram considerados como fluxos não contábeis, uma vez que esses componentes não foram aproveitados no processo de geração de energia em questão. Utilizando a Equação (23), obtêm-se as equações de balanceamento de fluxos de custo, Equações (52) a (54):

$$c_1\dot{m}_1 = c_2\dot{m}_2 + c_3\dot{m}_3 \quad (52)$$

$$c_3\dot{m}_3 = c_4\dot{m}_4 + c_5\dot{m}_5 \quad (53)$$

$$c_5\dot{m}_5 + \frac{Z_{bio}}{h_{bio}} = c_6\dot{m}_6 + c_8\dot{m}_8 + c_9\dot{m}_9 \quad (54)$$

Sendo:

c_1: fluxo contábil do RSU (US$/h);

c_2: fluxo contábil dos recicláveis (US$/h);

c_3: fluxo contábil do RSU' (US$/h);

c_4: fluxo contábil do rejeito (US$/h);

c_5: fluxo contábil do RSUO (US$/h);

c_6: fluxo contábil do adubo orgânico (US$/h);

c_8: fluxo contábil do H_2S (US$/h);

c_9: fluxo contábil do biogás limpo (US$/h);

Z_{bio}: Investimento anualizado da Solução Kompogas (US$);

h_{bio}: período de operação da Solução Kompogas em um ano (h).

Tabela 21 – Resumo dos processos de produção de biogás

Processo		**Entradas (Fluxos)**	**Saídas (Fluxos)**	**Z (US$)**	**Taxa de Juros (% a.a.)**	**CAE (US$/ano)**
A	Coleta Seletiva	1	2 e 3	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
B	Pré-tratamento	3	4 e 5	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
C	Solução Kompogas	5	6, 8 e 9	6.944.342,46	4	510.976,87
					6	605.439,42
					8	707.296,62
					10	815.679,86
					12	929.700,10

Fonte: O autor

Uma vez que a solução Kompogas depende de investimento de capital, o cálculo do fluxo contábil de saída depende do custo de capital empregado no investimento. Utilizando a Equação (26), pode-se obter o custo anual do investimento da solução Kompogas e, a partir das Equações (55), (56) e (57), obter o custo de cada um dos fluxos dos três processos necessários a produção do biogás. Os resultados são apresentados na Tabela *22*.

Tabela 22 – Apresentação dos custos por fluxo

Fluxo		ṁ (kg/s)	Taxa de Juros (% a.a.)	Custo do Fluxo (US$/kg)
1	RSU	1,6060	Não aplicável	0,0397
2	Recicláveis	0,6103	Não aplicável	0,0217
3	RSU'	0,9957	Não aplicável	0,0508
4	Rejeito	0,3533	Não aplicável	-
5	RSUO	0,6424	Não aplicável	0,0787
6	Adubo Org.	0,2138	Não aplicável	0,0662
8	H_2S	0,0000	Não aplicável	-
9	Biogás Limpo	0,4286	4 %	0,1227
			6 %	0,1297
			8 %	0,1373
			10 %	0,1453
			12 %	0,1537

Fonte: O autor

Considerando o fluxo de massa e de custo correspondente ao RSUO, apresentados na Tabela 22, além da energia contida no RSUO produzido, apresentado no item 3.3.2, obtêm-se o custo equivalente de 0,0207 US$/kWh.

3.4.3 Análise do subsistema CMG

O cálculo do custo da energia elétrica produzida no subsistema CMG utiliza o custo de investimento do biodigestor com o sistema de remoção de H_2S, além do investimento do gerador a biogás e foi calculada a partir da adaptação da metodologia baseada no equacionamento realizado por [68].

$$C_{elB} = \left[\frac{(INV_{Bio}+INV_{CMG}).f}{H.E_p}\right] + \left(\frac{C_{RSUO}.E_{comb}}{E_p}\right) + C_{manB} \qquad (55)$$

Sendo,

f = fator de anuidade baseado na taxa de juros;

H = período equivalente de utilização (horas/ano);

C_{RSUO} = custo do RSUO (US$/kWh);

E_{comb} = energia do combustível/RSUO (kWh);

E_p = energia produzida (kWh);

C_{manB} = custo de manutenção do subsistema a biogás (US$/kWh).

Considerando a taxa de juros variando de 4 % a.a. até 12 % a.a no cenário da vida útil da planta (20 anos), obtêm os resultados apresentados na Tabela *23*.

Tabela 23 - Custo da energia elétrica produzida pelo subsistema a biogás (US$/kWh)

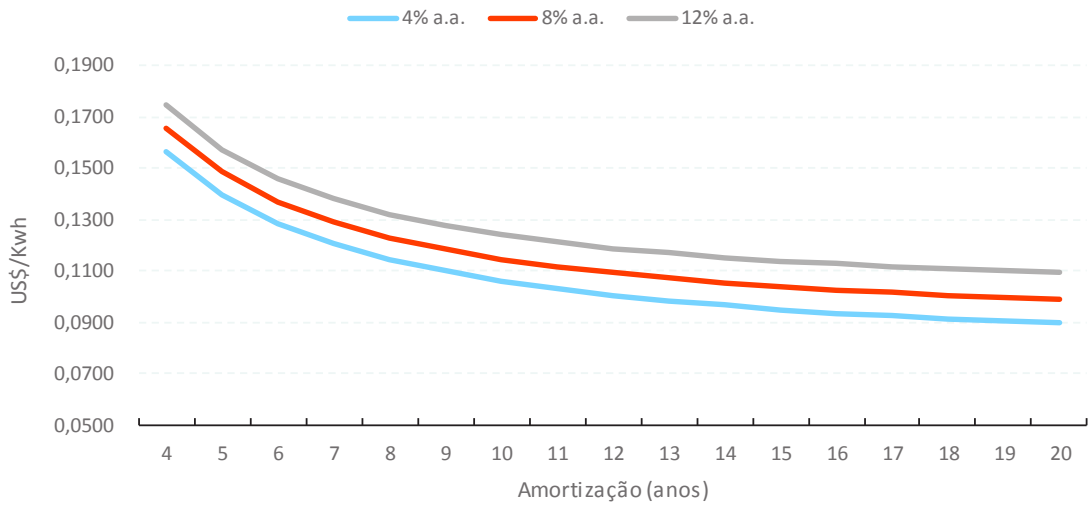
Taxa de juros x ano	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
4 %	0,4188	0,2414	0,1849	0,1567	0,1398	0,1285	0,1205	0,1145	0,1098	0,1061
6 %	0,4175	0,2464	0,1895	0,1610	0,1440	0,1327	0,1246	0,1186	0,1140	0,1103
8 %	0,4241	0,2515	0,1941	0,1655	0,1483	0,1370	0,1289	0,1229	0,1183	0,1146
10 %	0,4308	0,2566	0,1988	0,1700	0,1528	0,1414	0,1334	0,1274	0,1228	0,1192
12 %	0,4374	0,2618	0,2035	0,1745	0,1573	0,1459	0,1379	0,1320	0,1275	0,1239
Taxa de juros x ano	**11**	**12**	**13**	**14**	***15***	***16***	***17***	**18**	***19***	***20***
4 %	0,1030	0,1005	0,0984	0,0966	0,0950	0,0936	0,0924	0,0913	0,0904	0,0895
6 %	0,1072	0,1047	0,1026	0,1009	0,0993	0,0980	0,0968	0,0958	0,0949	0,0941
8 %	0,1117	0,1092	0,1071	0,1054	0,1039	0,1026	0,1015	0,1006	0,0997	0,0989
10 %	0,1163	0,1139	0,1119	0,1102	0,1088	0,1076	0,1065	0,1056	0,1048	0,1041
12 %	0,1211	0,1188	0,1168	0,1152	0,1139	0,1128	0,1118	0,1109	0,1102	0,1096

Fonte: O autor

Observa-se que o custo da energia elétrica produzida nesse subsistema varia de 0,4188 US$/kWh até 0,0895 US$/kWh, onde o custo cai à medida que o prazo (tempo) aumenta.

O Gráfico 4 representa o resultado obtido nos cenários de 4 % a.a, 8 % a.a. e 12 % a.a. É possível observar que o custo da energia elétrica apresenta uma grande variação em prazos menores.

Gráfico 4 - Custo da eletricidade produzida no CMG (US$/kWh)



Fonte: O autor

3.4.4 Análise do subsistema de painéis solares FV

De forma análoga ao cálculo do custo da energia elétrica do subsistema a biogás, o cálculo do custo da energia elétrica produzida no subsistema de painéis solares FV utiliza o custo de investimento dos painéis e foi calculado a partir da Equação (56)

$$C_{elFV} = \left(\frac{INV_{FV}.f}{H.E_p}\right) + C_{manFV} \qquad (56)$$

Sendo,

C_{manFV} = custo de manutenção do subsistema a biogás (US$/kWh).

Tabela 24 - Custo da energia elétrica produzida pelo subsistema FV (US$/kWh)

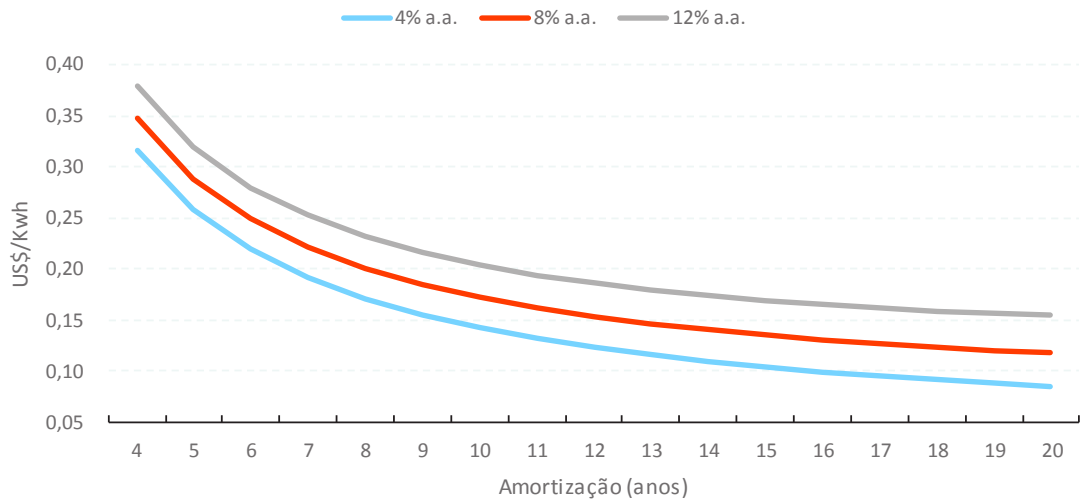
Taxa de juros x ano	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
4 %	1,1921	0,6083	0,4138	0,3166	0,2584	0,2196	0,1919	0,1712	0,1552	0,1423
6 %	1,2150	0,6257	0,4295	0,3316	0,2730	0,2340	0,2063	0,1855	0,1695	0,1567
8 %	1,2379	0,6433	0,4455	0,3469	0,2879	0,2488	0,2211	0,2004	0,1845	0,1718
10 %	1,2608	0,6609	0,4616	0,3624	0,3032	0,2641	0,2364	0,2158	0,2000	0,1875
12 %	1,2837	0,6787	0,4779	0,3782	0,3188	0,2797	0,2521	0,2317	0,2161	0,2038
Taxa de juros x ano	**11**	**12**	**13**	**14**	***15***	***16***	***17***	**18**	***19***	***20***
4 %	0,1319	0,1232	0,1158	0,1095	0,1041	0,0994	0,0953	0,0916	0,0883	0,0854
6 %	0,1463	0,1377	0,1305	0,1243	0,1190	0,1145	0,1104	0,1069	0,1038	0,1010
8 %	0,1615	0,1531	0,1460	0,1400	0,1349	0,1305	0,1267	0,1233	0,1204	0,1178
10 %	0,1774	0,1692	0,1623	0,1566	0,1517	0,1475	0,1439	0,1408	0,1380	0,1356
12 %	0,1940	0,1860	0,1794	0,1739	0,1693	0,1653	0,1620	0,1591	0,1566	0,1544

Fonte: O autor

Observa-se que o custo da energia elétrica produzida nesse subsistema varia de 1,2837 US$/kWh até 0,0854 US$/kWh, onde o custo cai à medida que o prazo (tempo) aumenta.

O Gráfico 5 representa o resultado obtido nos cenários de 4 % a.a, 8 % a.a. e 12 % a.a. É possível observar que o custo da energia elétrica apresenta uma grande variação em prazos menores.

Gráfico 5 - Custo da eletricidade produzida nos painéis FV (US$/kWh)

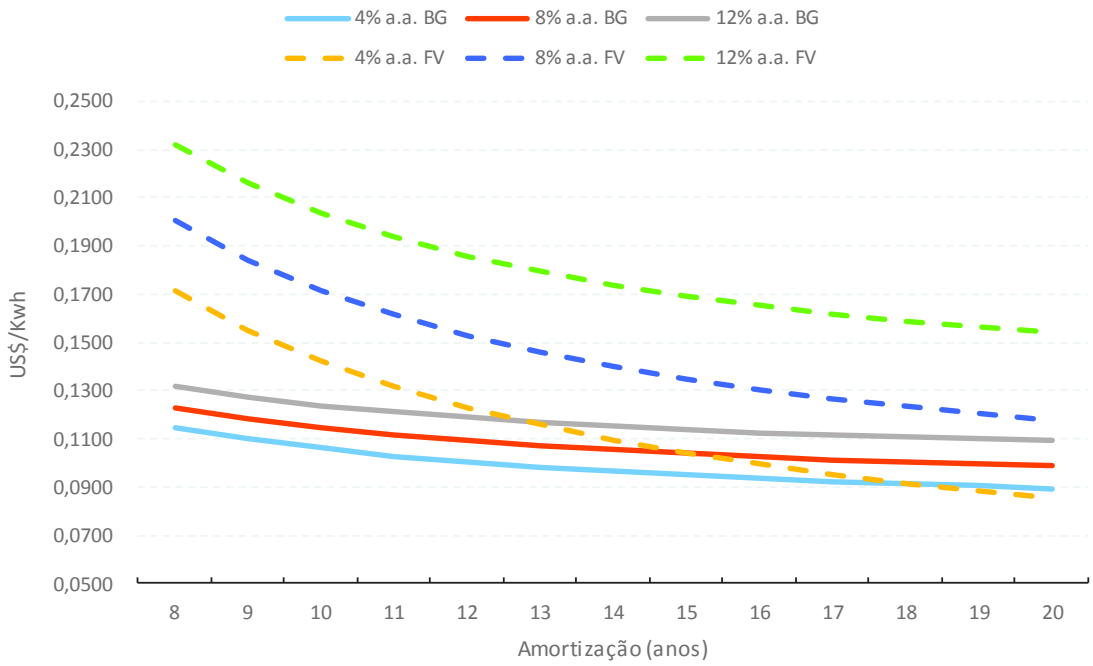


Fonte: O autor

3.4.5 Análise do sistema híbrido

A análise do sistema híbrido como um todo leva em consideração a contribuição de cada fonte de energia para a disponibilidade do sistema. A comparação entre o custo da eletricidade produzida pelos subsistemas de maneira isolada revela que, embora o custo da eletricidade no subsistema solar fotovoltaico seja maior nos primeiros anos, nos cenários de 4 % a.a. e 8 % a.a. de custo de capital, o custo fica abaixo do produzido no subsistema a biogás a partir do 11º ano e do 18º ano, respectivamente.

Gráfico 6 - Custo da eletricidade produzida nos subsistemas (US$/kWh)



Fonte: O autor

A análise do sistema híbrido como um todo leva em consideração a contribuição de cada fonte de energia para a disponibilidade elétrica do sistema. Entre os diversos cenários de custos de capital (4 %, 6 %, 8 %, 10 % e 12 % a.a.), foi calculada ainda a razão média entre os custos do subsistema a biogás e solar fotovoltaico utilizando a Equação (57).

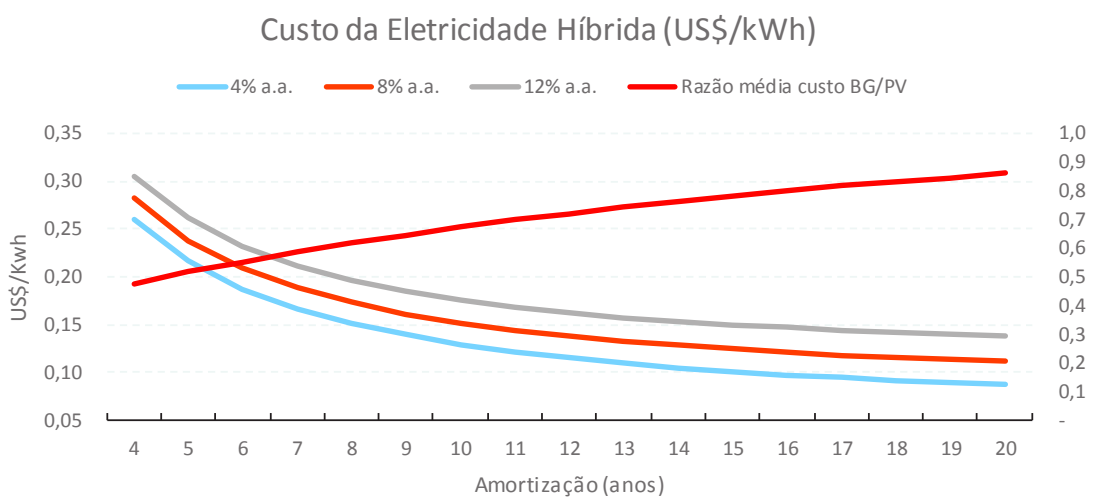
$$RM_{BG/FV} = \frac{\sum_{j=1}^{n} \frac{C_{elB}}{C_{elS}}}{n} \qquad (57)$$

Sendo,

n = número de cenários calculados.

No Gráfico 7 é apresentado o custo da eletricidade gerada pelo sistema híbrido.

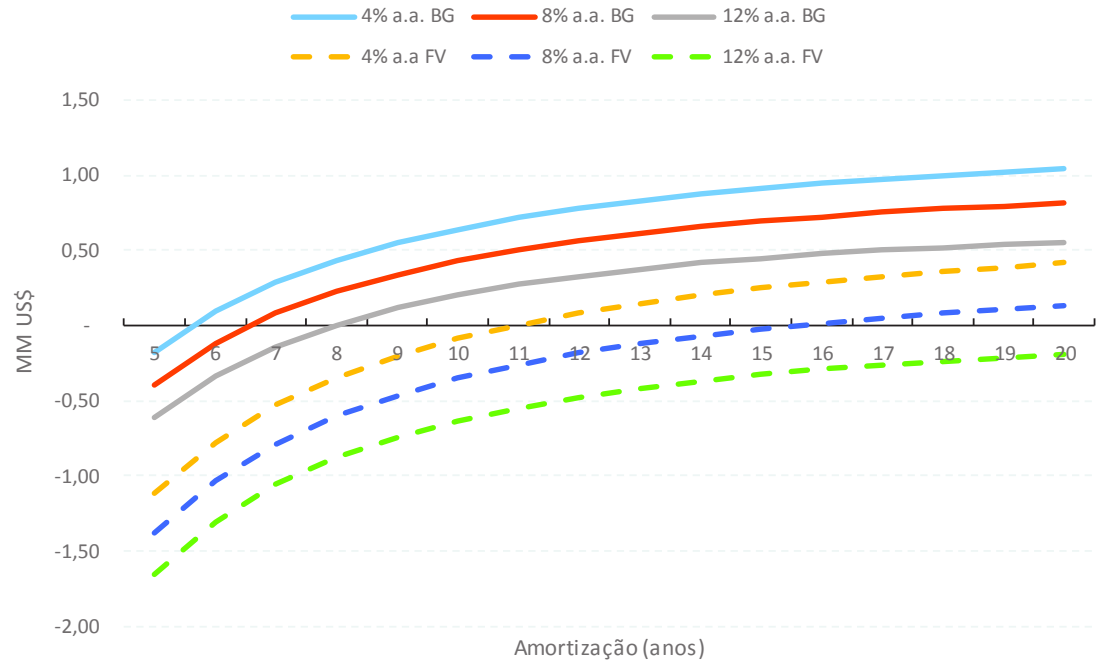
Gráfico 7 - Custo da eletricidade no sistema híbrido (US$/kWh)



Fonte: O autor

A receita do sistema se dá pelo fornecimento de energia elétrica para o sistema interligado. A receita da eletricidade dos subsistemas é apresentada no Gráfico 8. Como pode-se observar, quando maior a taxa de juros, menor a receita da eletricidade nos subsistemas, pois quanto maior o custo do capital, maior as despesas e, consequentemente, menor o ganho.

Gráfico 8 – Receita da eletricidade nos subsistemas (MM US$)



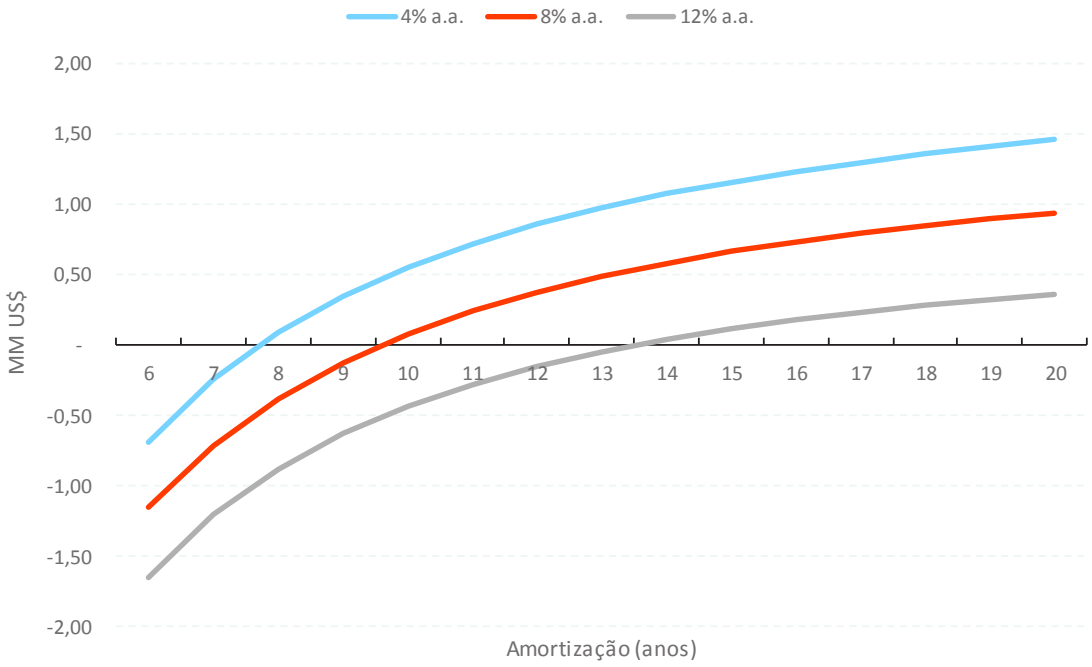
Fonte: O autor

Nesse gráfico é possível observar que no momento em que a curva de receita cruza o eixo horizontal, o projeto passa a gerar mais capital do que consome, passando a ser economicamente viável. O momento da interseção do eixo com a curva de receita é o *payback* do sistema. Como pode-se observar, os *paybacks* a diferentes custos de capital encontram-se no intervalo de 6 até mais de 20 anos. Quanto maior o custo de capital (taxa de juros do capital investido), maior o período necessário para recuperação do valor gasto no projeto (*payback*).

O gráfico 8 mostra que em todos os cenários a receita do subsistema a biogás é maior que a do subsistema solar, ainda que em período de tempo maiores (acima de 13 anos), o custo da eletricidade gerada pelo subsistema solar seja menor que o a biogás, em diferentes cenários, conforme pode ser observado no Gráfico 6. Isso ocorre pois o subsistema a biogás funciona 8.760 h/ano, enquanto o subsistema solar funciona apenas 1.747 h/ano.

A análise da receita do sistema híbrido estudado é apresentada no Gráfico 9.

Gráfico 9 – Receita da eletricidade no sistema híbrido (MM US$)



Fonte: O autor

É possível observar que, como esperado, o intervalo de payback entre os cenários de custo de capital do sistema híbrido como um todo é menor que o intervalo

dos subsistemas em separado, uma vez que o custo da eletricidade híbrida é uma ponderação da eletricidade gerada pelo biogás e pelos painéis solares fotovoltaicos. Como pode-se observar, os *paybacks* a diferentes custos de capital encontram-se no intervalo de 8 até 14 anos.

3.5 Discussões

A análise energética realizada em todos os volumes de controle do processo revela o fluxo mássico e o PCI da planta proposta, apresentada na Tabela *25*. Cabe observar que os pontos 12, 13 e 14 não possuem fluxo de massa, mas apenas de energia.

Tabela 25 – Análise do fluxo de massa ponto a ponto do processo

Ponto	Fluxo	ṁ (kg/s)	P (kPa)	T (ºC)	h (kJ/kg)
1	RSU	1,6060	101,3	25	13.737,63
2	Recicláveis	0,6103	101,3	25	16.726,04
3	RSU'	0,9957	101,3	25	11.906,02
4	Rejeito	0,3533	101,3	25	8.681,80
5	RSUO	0,6424	101,3	25	13.679,34
6	Adubo Org.	0,2138	101,3	25	10.170,78
7	Biogás	0,4286	101,3	25	15.429,00
8	H_2S	$2{,}07.10^{-5}$	101,3	25	15.192,00
9	Biogás Limpo	0,4286	101,3	25	15.429,01
10	Ar	0,4807	101,3	25	299,64
11	Gases de Exaustão	0,9613	1.700	150	462,93
12	Radiação Solar	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
13	Eletricidade CMG	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
14	Eletricidade FV	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável

Fonte: O autor

Desta forma, o processo pode ser representado como apresentado na Figura 22.

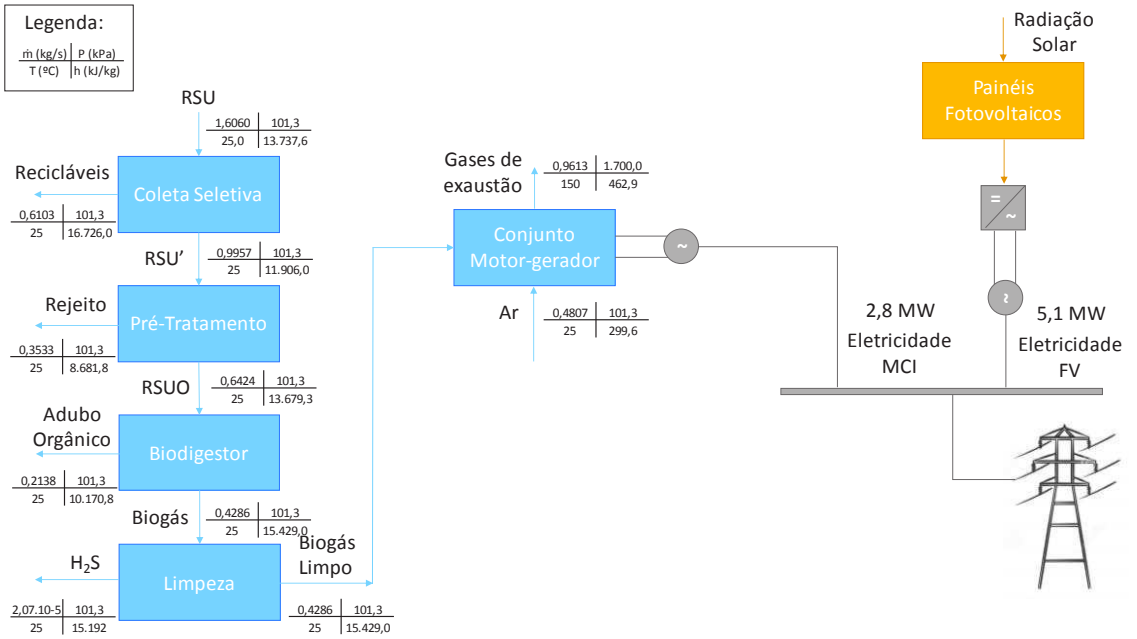


Figura 24 - Processo de geração de energia elétrica híbrida

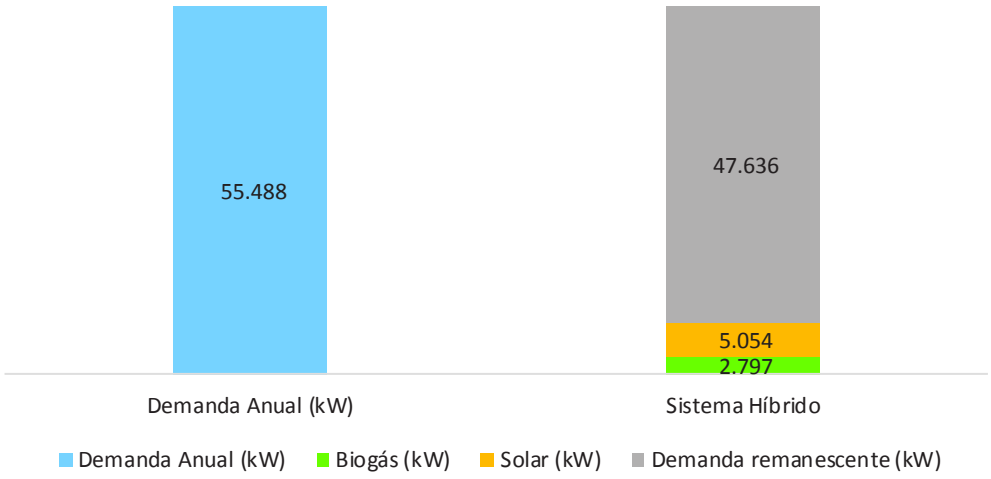
Fonte: O Autor

A análise energética comprovou a viabilidade técnica da produção de biogás a partir do RSU de Guarapuava/PR. A vazão mássica de biogás estimado alcançou 0,4286 kg/s, na composição com 58 % de CH_4 e 42 % de CO_2, fornecendo 2.797,42 kW de potência elétrica por meio de sua combustão em um CMG CG260-12 (50Hz) da Caterpillar. No presente estudo, não houve proposta de aproveitamento dos gases de exaustão provenientes da combustão do biogás no CMG, o que aumentaria a eficiência do processo, uma vez que na presente configuração, esses gases são desperdiçados para a atmosfera em alta temperatura.

Devido à alta disponibilidade de irradiação solar na região de Guarapuava, foram selecionados 36.123 painéis solares FV do tipo silício monocristalino, cujo conjunto gerou 5.054,40 kW de potência elétrica.

No Gráfico *10*, observa-se que, comparando a energia híbrida gerada com o total demandado pela comunidade de Guarapuava, a geração de energia híbrida do sistema proposto alcança 14,15 % da demanda anual por eletricidade, sendo 5,04% atendida pelo biogás e 9,11 % atendido pelos painéis solares fotovoltaicos.

Gráfico 10 - Comparação entre potência elétrica híbrida gerada x demanda da comunidade



Fonte: O autor

A vantagem do sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico aqui proposto é a não interrupção do fornecimento para a rede, uma vez que a queima do biogás armazenado pode ser usada para suprir a demanda por carga do sistema nos momentos de baixa irradiação solar.

Embora o sistema híbrido apenas supra 14,15 % da demanda anual por eletricidade da comunidade de Guarapuava, sua utilização vai ao encontro de duas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) ao qual o Brasil se comprometeu na 21ª Conferência das Partes (COP21) da UNFCCC: aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18 % até 2030, e alcançar uma participação estimada de 45 % de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030.

A eficiência energética obtida para o sistema híbrido, embora possa parecer baixa, 17,21 %, está dentro do valor esperado, lembrando que no subsistema alimentado a biogás, os gases de exaustão da combustão estão sendo desperdiçados. Caso estivessem sendo aproveitados como utilidade para o aquecimento de água, por exemplo, a eficiência energética global seria maior.

A partir da análise econômica do sistema, foi possível conhecer os custos da energia elétrica de cada subsistema e a energia do processo híbrido. Os custos dos subsistemas são apresentados na Tabela *26*. É possível observar que os custos do subsistema a biogás são, de modo geral, menores que os do subsistema solar FV.

Tabela 26 – Custos máximos e mínimos dos subsistemas (US$/kWh)

Subsistema	Custo de capital	C_{el} Mínimo (tempo =20 anos)	C_{el} Máximo (tempo = 1 ano)
BG	4 % a.a.	0,0895	0,4188
BG	6 % a.a.	0,0941	0,4175
BG	8 % a.a.	0,0989	0,4241
BG	10 % a.a.	0,1041	0,4308
BG	12 % a.a.	0,1096	0,4374
FV	4 % a.a.	0,0854	1,1921
FV	6 % a.a.	0,1010	1,2150
FV	8 % a.a.	0,1178	1,2379
FV	10 % a.a.	0,1356	1,2608
FV	12 % a.a.	0,1544	1,2837

Fonte: O autor

Analisando o sistema híbrido como um todo, observa-se que os custos se apresentam entre os valores de custo dos subsistemas a biogás e solar isoladamente, estando ele ponderado pela contribuição energética de cada um dos subsistemas.

Tabela 27 – Custos máximos e mínimos do sistema híbrido (US$/kWh)

Sistema	Custo de capital	C_{el} Mínimo (tempo =20 anos)	C_{el} Máximo tempo = 1 ano)
HB	4 % a.a.	0,0869	0,9172
HB	6 % a.a.	0,0985	0,9315
HB	8 % a.a.	0,1111	0,9486
HB	10 % a.a.	0,1244	0,9657
HB	12 % a.a.	0,1385	0,9828

Fonte: O autor

Como esperado, em períodos de amortização menores, o custo da energia gerada pelo subsistema solar FV é significativamente maior que o do a biogás e conforme se aumenta o período de amortização, o custo desse subsistema apresenta reduções maiores que no subsistema a biogás, tornando o sistema mais igualitário em sua composição de custos, aproximando-os da isonomia de custos ($RM_{BG/FV} = 1$), onde o custo médio da energia produzida pelos dois subsistemas é igual. Isso ocorre pois

apesar do investimento inicial do sistema solar ser maior, ele possui custos de operação e manutenção menores.

Considerando um período de amortização de 20 anos (a vida útil estipulada no presente estudo), foram dispostos na Tabela *28* os custos da energia gerada com referência ao valor presente líquido do projeto, considerando as receitas obtidas em um período de 20 anos de amortização.

Tabela 28 – Indicadores econômicos do sistema híbrido

Custo de Capital (a.a.)	Custo anual (US$/kWh)	VPL Amortização = 20 anos (US$)
4 %	0,0869	665.949,37
6 %	0,0985	377.401,34
8 %	0,1111	202.126,08
10 %	0,1244	97.604,78
12 %	0,1385	36.938,99

Fonte: O autor

Os valores dos custos anuais da energia híbrida foram comparados com a literatura. A partir desta comparação apresentada na Tabela 29, observa-se que os custos da energia híbrida nos cenários de custo de capital variando de 4 % a.a. a 12 % a.a. se encontram dentro do intervalo da literatura, mas abaixo do custo médio encontrado nas pesquisas.

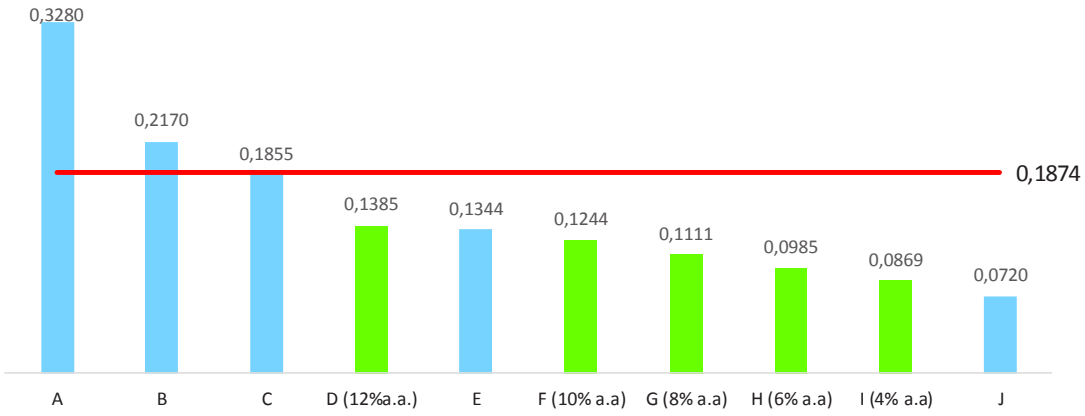
Tabela 29 – Comparação de custos da energia híbrida com a literatura

ID	Custo (US$/kWh)	Composição do sistema	Fonte
A	0,3280	Solar-Biomassa	[74]
B	0,2170	FV-Biogas-Diesel	[78]
C	0,1855	Solar-Biomassa	[76]
D (12 % a.a.)	0,1385	Solar-Biogás	O autor
E	0,1344	Solar-eólica-hidro-biomassa	[75]
F (10 % a.a.)	0,1244	Solar-Biogás	O autor
G (8 % a.a.)	0,1111	Solar-Biogás	O autor
H (6 % a.a.)	0,0985	Solar-Biogás	O autor
I (4 % a.a.)	0,0869	Solar-Biogás	O autor
J	0,0720	Hidro-Solar-Biogás	[77]

Fonte: O autor

O Gráfico *11* apresenta de forma ilustrativa essa comparação.

Gráfico 11 – Comparação do custo anual com a literatura (US$/kWh)



Fonte: O autor

O custo da energia híbrida do sistema proposto é inferior que a média da literatura (0,1874 US$/kWh), mas dentro do intervalo de custos das demais pesquisas. Cabe observar que a energia total do sistema é obtida apenas pela conversão realizada pelos painéis solares fotovoltaicos e pela combustão do biogás, sendo os gases provenientes da exaustão da combustão descartados. O aproveitamento desses gases e consequente monetização são ainda um potencial para a redução do custo da energia

desse sistema híbrido.

Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

A geração crescente de resíduos sólidos urbanos pelas cidades ressalta a importância da destinação adequada dos mesmos, uma vez que se descartados indevidamente, possuem potencial contaminante para o meio ambiente. A utilização dos RSUs para a geração de energia elétrica possui relevante caráter econômico-estratégico para as cidades, uma vez que ajuda a equacionar duas questões chave: o descarte adequado dos resíduos gerados e a geração de energia elétrica.

Sistemas híbridos são aqueles que utilizam mais de uma fonte de energia, trazendo flexibilidade e confiabilidade à geração de energia. O presente estudo analisou técnico-economicamente, em um cenário determinístico, a viabilidade da implantação de um sistema híbrido biogás-solar fotovoltaico a partir dos RSU de Guarapuava/PR.

O processo proposto é composto por um biodigestor Kompogas, um motor Caterpillar CG260-12 (50Hz) e 36.123 painéis solares fotovoltaicos de Silício monocristalino. Nesse processo, após a combustão do biogás, os gases de exaustão são descartados.

A partir da caracterização do RSU produzido no município de Guarapuava, foi possível estimar a produção e composição do biogás a partir da tecnologia selecionada. O produto da queima do biogás produzido em um MCI gerou 2.797,42 kW de potência elétrica no ano. A geração de energia elétrica a partir dos painéis solares fotovoltaicos agregou mais 5.054,40 kW de potência elétrica no ano. Considerando o custo de capital variando de 4 % a.a. a 12 % a.a. em um período de 20 anos de amortização. Neste sistema, a eficiência energética é de 17,21 %, que pode ser considerada baixa, mas está dentro do esperado, uma vez que os gases de exaustão são descartados, o que reduz a eficiência do processo.

O custo da eletricidade gerada pelo sistema híbrido proposto variou entre 0,0869 US$/kWh e 0,1385 US$/kWh, estando esses valores coerentes com os encontrados na literatura.

A relevância do presente estudo, além da comprovação dos benefícios econômicos do sistema, é ampliar a discussão sobre novas fontes de obtenção de energia elétrica que antes poderiam ser consideradas mais caras que a geração convencional, mas com a constante evolução tecnológica e redução dos custos de fabricação, vêm apresentando custos mais atrativos. Além disso, a potencial utilização de fontes renováveis para a geração de energia vai ao encontro das novas pressões e anseios sociais pela migração para uma matriz energética mais sustentável.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- Aproveitamento térmico dos gases de exaustão dos motores de combustão interna, o que geraria maior retorno econômico da planta proposta;
- Avaliar como a variação (crescimento ou decrescimento) do número de habitantes de Guarapuava, bem como a variação (crescimento ou decrescimento) na produção per capita de RSU impacta o sistema híbrido aqui proposto;
- Realizar a análise termoeconômica do sistema híbrido de modo a verificar os custos dos fluxos em todos os volumes de controle do processo;
- Realizar a análise dos aspectos ambientais do sistema proposto;
- Comparar com sistema solar heliotérmico;
- Analisar o impacto do reaproveitamento dos resíduos recicláveis (venda);
- Analisar o impacto da gaseficação dos resíduos orgânicos e do chorume.

Referências

[1] D. HOORNWEG, P.BHADA-TATA e C. KENNEDY, "Waste production must peak this century," *Nature,* vol. 502, nº NOV, pp. 615-617, 2013.

[2] United States Environmental Protection Agency (EPA), "Municipal Solid Waste - EPA," 2016. [Online]. Available: https://cfpub.epa.gov/roe/indicator_pdf.cfm?i=53. [Acesso em 9 Março 2019].

[3] N. SCARLAT, J. F. DALLEMAND, F. MONFORTTI-FERRARIO e L. MOFOR, "Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* nº 50, pp. 1269-1286, 2015.

[4] "Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil," ABRELPE, 2015.

[5] "Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil," ABRELPE, 2017.

[6] R. O. TENORIO, "Estudo para Aproveitamento Energético de Biogás de Resíduos Sólidos Urbanos em Campo Grande/MS," Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2015.

[7] "Definição - Biogás," Cetesb - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2019. [Online]. Available: https://cetesb.sp.gov.br/biogas/. [Acesso em 9 Março 2019].

[8] N. P. SCHMEIER, L. P. GOMES e M. MANCIO, "Geração e uso do Biogás a partir de Resíduos Sólidos Urbanos: Revisão sobre os desafios e oportunidade de pesquisa e desenvolvimento," *7º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos,* 15 a 17 Junho 2016.

[9] T. M. O. SIQUEIRA e M. L. R. C. L. ASSAD, "Compostagem de resíduos sólidos no Estado de São Paulo (Brasil)," *Ambiente & Sociedade ,* vol. XVIII, nº 4, pp. 243-264, 2015.

[10] D. R. C. CARNEIRO, *Viabilidade técnica e econômica de uma unidade centralizadas de co-digestão anaeróbia de resíduos orgânicos,* Porto (Portugal): Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia, 2009.

[11] L. MATSAKAS, Q. GAO, S. JANSSON, U. ROVA e P. CHRISTAKOPOULOS, "Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals," *Electronic Journal of Biotechnology,* nº 26, pp. 69-83, 2017.

[12] I. U. KHANA, M. H. D. OTHMAN, H. HASHIM, T. MATSUURA, A. F. ISMAIL, M. REZAEI-DASHTARZHANDI e I. W. AZELEE, "Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage," *Energy Conversion and Management,* nº 150, pp. 277-294, 2017.

[13] Ministério das Cidades, *O estado da arte da tecnologia de metanização seca,* Brasília, 2015.

[14] L. P. LINS, J. Y. L. MITO e D. M. FERNANDES, "Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa," em *IV Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais*, Rio de Janeiro, 2015.

[15] O. SOUZA, M. FEDERIZZI, B. COELHO, T. M. WAGNER e E. WISBECK, "Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás," *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,* vol. 14, nº 4, pp. 438-443, 2010.

[16] A. E. NETO e Z. SOUZA, "Panorama do Biogás no Brasil – Setor Sucroalcooleiro," em *RenovaBio Biocombustíveis 2030/ Oficina Biogás e Biometano*, Brasília, 2016.

[17] A. BOBROFF-MALUF e C. G. SANCHEZ, "Avaliação termoeconômica da cogeração e da

geração no setor sucroenergético," *Ciência e Tecnologia,* vol. 18, nº 33, pp. 37-47, 2015.

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

[19] R. D. OLIVEIRA, "Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono," Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

[20] R. B. SANTOS e A. K. C. LIMA, "Análise comparativa do biogás: Processo em biodigestores e de aterro sanitário," *Revista eletrônica de Energia,* vol. 6, nº 1, pp. 48-57, 2016.

[21] Ministério das Cidades, *Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil?: Substratos, digestores e uso de biogás,* Brasília, 2015.

[22] J. HOLM-NIELSEN, T. SEADI e P. OLESKOWICZ-POPIEL, "The future of anaerobic digestion and biogas utilization," *Bioresource Technology,* nº 100, pp. 5478-5484, 2009.

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

[24] C. TILLMANN, Motores de combustão interna e seus sistemas, Pelotas: Rede e-Tec Brasil, 2013.

[25] Caterpillar, "Gerador à gás CG260," Caterpillar, [Online]. Available: https://www.cat.com/pt_BR/products/new/power-systems/electric-power-generation/gas-generator-sets/2661581332380753.html. [Acesso em 023 Abril 2019].

[26] NASA, "A MEETING WITH THE UNIVERSE: The Nature of the Sun," National Aeronautics and Space Administration (NASA), [Online]. Available: https://history.nasa.gov/EP-177/ch3-2.html. [Acesso em 10 Março 2019].

[27] E. B. PEREIRA, F. R. MARTINS, A. R. GONÇALVES, R. S. COSTA, F. J. L. LIMA, R. RUTHER, S. L. ABREU, G. M. TIEPOLO, S. V. PEREIRA e J. G. SOUZA, Atlas brasileiro de energia solar, São José dos Campos: INPE, 2017.

[28] J. J. ROBERTS, *Análise de desempenho de um sistema híbrido de geração de energia solar-eólico-diesel considerando variações probabilísticas da carga dos recursos renováveis,* Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), 2012.

[29] A. ALVES, "Energia Solar Fotovoltaica (2379EE2)," 2016. [Online]. Available: http://www4.feb.unesp.br/dee/docentes/alceu/2379teo_arquivos/07%20Aula%20Energia%20Solar%20FV.pdf. [Acesso em 17 Março 2019].

[30] A. VALLERA e M. BRITO, "Meio século de história fotovoltaica," *Gazeta de Física,* pp. 10-15, 2006.

[31] E. C. VALADARES, "Ensinando física moderna no segundo grau: Efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro," *Cad.Cat.Ens.Fís.,* vol. 15, nº 2, pp. 121-135, 1998.

[32] Trinasolar, "Products&Solutions - Datasheets," [Online]. Available: https://www.trinasolar.com/en-glb/resources/downloads. [Acesso em 10 Março 2019].

[33] JA Solar, "Product Datasheet," [Online]. Available: http://www.jasolar.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=67. [Acesso em 10 Março 2019].

[34] Canadian Solar, "Solar Modules - Datasheet," [Online]. Available: https://www.canadiansolar.com/en/solarPanels/detail/26. [Acesso em 10 Março 2019].

[35] GLC, “Painéis Solares,” [Online]. Available: https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-gcl-p6-60-270wp.html. [Acesso em 10 Março 2019].

[36] Longi Solar, “Products,” [Online]. Available: http://en.longi-solar.com/home/products/module/id/41.html. [Acesso em 10 Março 2019].

[37] Risen Energy, “Products - Full Cell,” [Online]. Available: http://risenenergy.com/index.php?c=show&id=264. [Acesso em 10 Março 2019].

[38] Yingli Solar, “Produtos,” [Online]. Available: http://www.yinglisolar.com/br/products/13. [Acesso em 10 Março 2019].

[39] NeoSolar, “PROJETO - ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA,” [Online]. Available: https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-conectados-grid-tie/projeto. [Acesso em 17 Março 2019].

[40] J. T. PINHO, Sistemas híbridos. Soluções energéticas para a Amazônia, Brasília: Ideorama Design e Comunicação Ltda., 2008.

[41] V. CAMPOS-GUZMAN, M. GARCIA-CASCALES e N. U. A. ESPINOSA, “Life Cycle Analysis with Multi-Criteria Decision Making: A review of approaches for the sustainability evaluation of renewable energy technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* nº 104, pp. 343-366, 2019.

[42] D. BARUAH e C. ENWEREMADU, “Prospects of decentralized renewable energy to improve energy access: A resource-inventory-based analysis of South Africa,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* nº 103, pp. 328-341, 2019.

[43] M. HOSSAIN, “Sustainable technology for energy and environmental benign building design,” *Journal of Building Engineering,* nº 22, pp. 130-139, 2019.

[44] C. MEZA, C. RODRIGUEZ, C. DAQUINO, N. AMADO, A. RODRIGUES e I. SAUER, “Toward a 100% renewable island: A case study of Ometepe's energy mix,” *Renewable Energy,* nº 132, pp. 628-648, 2019.

[45] L. ZHAN, F. LI, B. SUN e C. ZHANG, “Integrated Optimization Design of Combined Cooling, Heating, and Power System Coupled with Solar and Biomass Energy,” *Energies,* vol. 12, nº 687, 2019.

[46] A. RAZA e T. MALIK, “Energy management in commercial building microgrids,” *Journal of renewable and sustainable energy,* nº 11, 2019.

[47] W. ZAPPA, M. JUNGINGER e M. BROEK, “Is a 100% renewable European power system feasible by 2050?,” *Applied Energy,* nº 233-234, pp. 1027-1050, 2019.

[48] D. STRUBING, A. MOELLER, B. MOBNANG, M. LEBUHN, J. E. DREWES e K. KOCH, “Anaerobic thermophilic trickle bed reactor as a promising technology for flexible and demand-oriented H2/CO2 biomethanation,” *Applied Energy,* nº 232, pp. 534-554, 2018.

[49] R. NETO, I. M. M. BERCHIN, S. BERCHIN, W. XAVIER e J. GUERRA, “An integrative approach for the water-energy-food nexus in beef cattle production: A simulation of the proposed model to Brazil,” *Journal of Cleaner Production,* nº 204, pp. 1108-1123, 2018.

[50] A. KUMAR, N. PATEL, N. GUPTA e V. GUPTA, “Photovoltaic Power Generation in Indian Prospective Considering Off-grid and Grid Connected Systems,” *INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH,* vol. 8, nº 4, pp. 1936-1950, 2018.

[51] B. H. XAVIER, “Aspectos termodinâmicos, ecológicos e econômicos de sistemas de cogeração com motores de combustão interna operando com gás natural, biogás e gás de síntese,” UNESP, Guratinguetá, 2016.

[52] C. L. SILVA e H. B. C. MOREIRA, “Avaliação energética de um sistema de refrigeração por absorção utilizando gás de aterro e gás natural,” *Science & Engineering Journal,* pp. 11-

16, Dezembro 2008.

[53] F. S. FLORENTINO, P. M. SOBRINHO e J. L. SILVEIRA, “Aproveitamento energético de resíduos sólidos aplicado à avicultura de corte,” UNESP/Departamento de Energia.

[54] L. B. BRAGA, J. L. SILVEIRA, M. E. SILVA, C. E. TUNA e R. A. M. BOLOY, “Análise técnica, econômica e ecológica da reforma a vapor de biogás,” VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luiz/MA, 2012.

[55] D. MACHADO, *Análise de desempenho de um motor ciclo otto com biogás,* São Leopoldo: UNISINOS, 2014.

[56] W. BIZZO, *EM 722 - Geração, Distribuição e Utilização de Vapor.*

[57] J. Barros, *Combustão.*

[58] A. Junior, *Análise do Aproveitamento Energético do Biogás Produzido numa Estação de Tratamento de Esgoto,* Ilha Solteira: UNESP, 2008.

[59] Instituto de Física - UFRGS, “Termodinâmica,” UFRGS, [Online]. Available: http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20041/Melissa/semnome2.htm. [Acesso em 02 Abril 2019].

[60] H. F. A. F. P. R. REIS, “Análise termoeconômica de cogeração com resíduos de palma,” *The journal os Engineering and exact sciences – JCEC,* vol. 3, nº 7, pp. 975-985, 2017.

[61] E. L. S. F. SOARES, *Estudo da carcaterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos,* Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

[62] J. ROBERTS, *Otimização de sistemas híbriodos de geração de enrgia solar-eólico-diesel através de métodos metaheurísticos e função multiobjetivo,* Guaratinguetá: UNESP, 2016.

[63] M. e. F. A. SILVA, “Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL), valor anual equivalente (VAE) e valor esperado da terra (VET),” *Sociedade de Investigaç˜çoes Florestais,* vol. 29, nº 6, pp. 931-936, 2015.

[64] Dicionário Financeiro, [Online]. Available: https://www.dicionariofinanceiro.com/valor-presente-liquido/. [Acesso em 06 Abril 2019].

[65] J. J. C. S. SANTOS, “Avaliação exergonômica das tecnologias para a produção combinada de eletricidade e água dessalinizada,” Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

[66] A. JUNIOR e M. FAGA, “Substituição de motores elétricos por motores de combustão interna de ciclo otto a gás natural em instalações de bombeamento de petróleo e seus derivados,” *3º Congresso Basileiro de P&D em Petróleo e Gás,* 2005.

[67] A. G. FELDENS, C. J. MULLER, T. P. FILOMENA, F. J. NETO, A. S. CASTRO e M. J. ANZANELLO, “Política para avaliação e substituição de frota por meio da adoção de modelo multicritério,” *ABCustos, São Leopoldo: Associação Brasileira de Custos,* vol. 5, nº 1, pp. 61-91, 2010.

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

[69] Y. C. MIRANDA e F. F. M. NETO, “Viabilidade do uso de biogás como fonte de energia renovável em aterros sanitários,” *V SNGC,* 2017.

[70] P. d. Guarapuava, “Sobre Guarapuava,” [Online]. Available: http://www.guarapuava.pr.gov.br/turista/sobre-guarapuava/. [Acesso em 9 Julho 2018].

[71] IBGE, “Cidades IBGE,” IBGE, [Online]. Available: https://cidades.ibge.gov.br/. [Acesso em 6 Março 2019].

[72] Empresa de Pesquisa Energética, “Anuário estatístico de energia elétrica,” EPE, Rio de Janeiro, 2018.

[73] IPARDES, “Projeção da população dos municípios do Paraná para o período 2018 a 2040,” 2018.

[74] C. GHENAI e I. JANAJREH, “Design of solar-biomass hybrid microgrid system in Sharjah,” *Energy Procedia,* nº 103, pp. 357-362, 2016.

[75] N. VARSHNEY, M. SHARMA e D. KHATOD, “Sizing of a hybrid energy system using Homer,” *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering,* vol. 3, nº 6, pp. 436-442, 2013.

[76] A. HEYDARI e A. ASKARZADEH, “Optimization of a biomass-based photovoltaic power plant for an off-grid application subject to loss of power supply probability concept,” *Applied Energy,* nº 165, pp. 601-611, 2016.

[77] A. NISHRINA, A. RISDIYANTO e A. NANDIYANTO, “Hybrid energy system design of micro hydro-pv-biogas based micro-grid,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* nº 180, 2017.

[78] S. SALEHIN, A. ISLAM, R. HOQUE, M. RAHMAN, A. HOQUE e E. MANNA, “Optimized model of a solar pv-biogas-diesel hybrid energy system for Adorsho Char Island, Bangladesh”.

[79] M. TANIM, N. CHOWDHURY, M. RAHMAN e J. FERDOUS, “Design of a photovoltaic-biogas hybrid power generation systrem for bangladesh remote area using homer software”.

[80] J. BIANEK, W. N. SCHIRMER, A. CABRAL, C. MAYER, P. M. EURICH e E. H. MARTINS, “Comparação entre metodologias USEPA e IPCC para estimativa teórica de produção de biogás em aterro municipal,” *BIOFIX Scientific Journal,* vol. 3, nº 1, pp. 34-40, 2018.

[81] Kuttner do Brasil, “Solução no tratamento de resíduos sólidos urbanos,” [Online]. Available: http://www.kuttner.com.br/Files/Filer/Downloads/pt/kuttner_apr_beneficiamento_lixo_urbano.pdf. [Acesso em 19 Julho 2018].

[82] Ministério do Desenvolvimento Regional, “SNIS - Série Histórica,” 2019. [Online]. Available: http://app4.cidades.gov.br/serieHistorica/#. [Acesso em 17 Março 2019].

[83] K. AG, “Kompogas AG, Presentation Veolia UK,” 2 Julho 2007. [Online]. Available: http://www.elogrupo.com/spain/download_arq.asp?aq=Kompogas.pdf.

[84] M. C. GUIMARAES, R. F. PAULINO, J. L. SILVEIRA e C. E. TUNA, “The use of biogas from landfills of São Paulo city for bioeletricity generation,” *The XII latin-american congress on eletricity generation and transmission - CLAGTEE,* 2017.

[85] Portal das Energias Renováveis, “Propriedades do Biogás,” [Online]. Available: http://energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=65&ID_area=2&ID_sub_area=2. [Acesso em 11 Julho 2018].

[86] Kompogas, “There is still a lot of energy inside,” Kompogas, [Online]. Available: http://www.elogrupo.com/spain/download_arq.asp?aq=Kompogas.pdf. [Acesso em 16 Julho 2018].

[87] Ecologica, “Conversao Calculator - ppm to mg/m³,” [Online]. Available: http://ecologica.com.br/ecologica/PPMm3.php. [Acesso em 22 Julho 2019].

[88] “Poder Calorífico das Substâncias Puras,” [Online]. Available: http://www.antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/podercalorifico.php. [Acesso em 17 Março 2019].

[89] “CATTERPILLAR,” CAT® cg260 series gas generator sets, [Online]. Available: https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/LEBE0018-01. [Acesso em 21 Julho 2018].

[90] L. (. d. M. e. E. d. R. R. d. E. /. C. (. d. C. d. S. T. /. I. (. N. d. P. E. –. Brasil, “Base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar,” 2017.

[91] A. ANGONESE, A. CAMPOS, C. ZACARKIM, M. MATSUO e F. CUNHA, “Eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor,” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,* vol. 10, nº 3, pp. 745-750, 2006.

[92] UOL, “Economia e Cotações,” UOL, [Online]. Available: https://economia.uol.com.br/cotacoes/cambio/dolar-comercial-estados-unidos/. [Acesso em 20 Julho 2018].

[93] S. F. V. SOLOMON, “Geração de energia com reaproveitamento de resíduos sólidos: valuation em um projeto piloto em Belo Horizonte - MG,” FPL, Belo Horizonte/MG, 2016.

[94] Energisa, “Quadro de tarifas,” [Online]. Available: https://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx. [Acesso em 06 Abril 2019].

[95] CGN. [Online]. Available: https://cgn.inf.br/noticia/177692/perimetro-urbano-maior-impacta-no-custo-do-recolhimento-do-lixo. [Acesso em 20 05 2019].

[96] L. LUCENA, “Sólidos Urbanos no Recife e Jaboatão dos Guararapes,” UFPE, Recife, 2004.

[97] “BIOGÁS,” Cetesb - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 01 03 2019. [Online]. Available: https://cetesb.sp.gov.br/biogas/.

[98] “Grupo de Pesquisa em Sustentabilidade e Inovação,” GPS, [Online]. Available: http://www.ufrgs.br/gps/pesquisa/rsu. [Acesso em 09 Julho 2019].

[99] “Ministério do Meio Ambiente,” MMA, [Online]. Available: http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos. [Acesso em 09 Julho 2019].

[100] “Centro Internacional de Energias Renováveis-Biogás,” CIBiogás, [Online]. Available: https://www.cibiogas.org/biogas. [Acesso em 22 Julho 2019].

[101] W. Q. LAMAS, “Análise termoeconômica de uma min-estação de tratamento de esgoto com auto-suficiência energética,” UNESP, Guaratinguetá, 2007, 135 f..

[102] F. V. ABREU, M. A. F. C. FILHO e M. C. L. SOUZA, “Biogás de aterros sanitários para geração de energia renovável e limpa - Um estudo de viabilidade técnica e econômica,” PPG-EM/UERJ.

[103] “Câmbio dólar comercial em 20/07/2018,” UOL Economia Cotações, 2018. [Online]. Available: https://economia.uol.com.br/cotacoes/cambio/dolar-comercial-estados-unidos/. [Acesso em 21 Julho 2018].

[104] A. COLDEBELLA, S. N. M. SOUZA, J. SOUZA e A. C. KOHELER, “Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bovinocultura de leite,” [Online]. Available: http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n6v2/123.pdf.

[105] “Resumo dos resultados dos Leilões de Geração no ACR de 2005 a 2018: UTE Biogas Bonfim - Leilão 1/2016,” ANEEL, [Online]. Available: http://www.aneel.gov.br/resultados-de-leiloes. [Acesso em 04 Agosto 2018].

[106] M. HABIB, S. A. M. SAID, M. A. EL-HADIDY e I. AL-ZAHARNA, “Optimization procedure of a hybrid photovoltaic wind energy system,” *Energy,* nº 24, pp. 919-929, 1999.

[107] Ministério do Meio Ambiente, “Acordo de Paris,” Ministério do Meio Ambiente, [Online]. Available: http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris. [Acesso em 30 Março 2019].

[108] ONU, “Conheça os novos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU,” ONUBR, 12 Abril 2017. [Online]. Available: https://nacoesunidas.org/conheca-os-novos-17-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-da-onu/. [Acesso em 30 Março 2019].

[109] ABNT, *Resíduos sólidos – Classificação ABNT NBR 10004:2004,* 2004.

[110] América do Sol, “Potência Solar no Brasil,” [Online]. Available: http://americadosol.org/potencial-solar-no-brasil/. [Acesso em 02 Abril 2019].

[111] CGEE, “Produção de silício grau solar no Brasil,” Brasília, 2009.

[112] BNDES, “A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?,” em *BNDES Setorial 40*, BNDES, pp. 205-234.

[113] W. JEAN, *Estudo de um sistema fotovoltaico-eólico para uma comunidade isolada no Haiti,* Brasília: UnB, 2017.

[114] F. FAHMY e H. A. FARGHALLY, “Photovoltaic-Biomass Gasifier Hybrid Energy System for a Poultry House,” *International Journal of Modern Engineering Research,* vol. 4, nº 8, pp. 51-62, 2014.