
PROGRAMA INTEGRADO (UNESP, USP E UNICAMP) DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
BIOENERGIA

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS:
MATRIZES TECNOLÓGICAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA E
PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

RAUL PEREIRA MICENA

Rio Claro – SP
2024



PROGRAMA INTEGRADO (UNESP, USP E UNICAMP) DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
BIOENERGIA

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS:
MATRIZES TECNOLÓGICAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA E
PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

RAUL PEREIRA MICENA

Tese apresentada ao Instituto de Pesquisa em Bioenergia de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira
Coorientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

Rio Claro – SP
2024

M619a	<p>Micena, Raul Pereira</p> <p>Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: matrizes tecnológicas para geração de energia e produção de hidrogênio / Raul Pereira Micena. -- Rio Claro, 2024</p> <p>131 p. : il., tabs.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Pesquisa em Bioenergia, Rio Claro</p> <p>Orientador: José Luz Silveira</p> <p>Coorientador: Celso Eduardo Tuna</p> <p>1. Aproveitamento energético. 2. Centrais elétricas. 3. Resíduos sólidos. 4. Hidrogênio. I. Título.</p>
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Pesquisa em Bioenergia, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Matrizes Tecnológicas para Geração de Energia e Produção de Hidrogênio

AUTOR: RAUL PEREIRA MICENA

ORIENTADOR: JOSE LUZ SILVEIRA

COORIENTADOR: CELSO EDUARDO TUNA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Bioenergia, área: Bioenergia pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSE LUZ SILVEIRA (Participação Presencial)

Instituto de Pesquisa em Bioenergia IPBEN / Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratingueta



Documento assinado digitalmente

Prof. Dr. TEOFILO MIGUEL DE SOUZA (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia Eletrica / Faculdade de Engenharia e Ciências de Gu



TEOFILO MIGUEL DE SOUZA

Data: 26/02/2024 13:15:22-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. ANTONIO GARRIDO GALLEGO (Participação Presencial)

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas / Universidade Federal do ABC

Documento assinado digitalmente

Prof.^a Dr.^a DANIELA HELENA PELEGRINE GUIMARÃES (Participação Presencial) 

Departamento de Engenharia Química / EEL/USP

ANTONIO GARRIDO GALLEGO

Data: 23/02/2024 15:40:37-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Documento assinado digitalmente



DANIELA HELENA PELEGRINE GUIMARAES

Data: 26/02/2024 11:33:30-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Rio Claro, 20 de fevereiro de 2024

AGRADECIMENTOS

Sou grato pela oportunidade da vida e de ter tido condições de realizar este trabalho, por ter conhecido pessoas que, direta ou indiretamente, fizeram com que este trabalho fosse possível.

À minha família, meus pais José e Dirce, por terem me trazido ao mundo e me ensinado a importância do estudo. Aos meus irmãos Marcelo e Fernando, pelo exemplo e pelo apoio desde sempre.

À minha namorada, Letícia, pelo amor e carinho, por me dar forças em acreditar que tudo é possível. Obrigado por estar ao meu lado e por ser meu porto seguro. Te amo muito!

Agradeço aos meus amigos Víctor Arruda e Lucas Rezende, meus colegas de laboratório Omar Llerena, Carlos Moura, Lucas Pamplona, Paulo Cordaro e Germán Picón. Ao amigo Luís Calado, pela ajuda em tudo, pela recepção no IPPortalegre e pelos momentos memoráveis. Obrigado a vocês por todo o apoio e amizade.

Obrigado a tantos outros que estiveram presentes na minha trajetória, pela parceria, pelas conversas e *insights*, pelos momentos de descontração que são indispensáveis ao processo criativo e a uma vida boa. Um agradecimento especial aos amigos de Portalegre, Guilherme e Mayumi, um caloroso abraço à Bruna, à Bia e ao Léo. Um brinde aos amigos Armando (“Manga”) e Wagner.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. José Luz Silveira e coorientadores, Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna e Prof. Dr. Paulo Sérgio Duque de Brito.

À comunidade da FEG – UNESP, ao Programa Integrado de Bioenergia e à CAPES, pelo financiamento deste projeto.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço à Universidade Estadual Paulista pelo apoio à realização deste trabalho e à CAPES pela concessão da bolsa de doutorado, processo 88887.634370/2021-00.

Parte dessa pesquisa foi financiada por meio do Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior – PDSE.

Número do processo: 88881.690338/2022-01

Instituição no exterior: Instituto Politécnico de Portalegre (Portugal)

Coorientador na instituição no exterior: Prof. Dr. Paulo Sérgio Duque de Brito

Período de bolsa concedido: 10/2022 a 05/2023

Edital: PDSE - Edital nº 10/2022 - Seleção 2022

“Há verdadeiramente duas coisas diferentes: saber e crer que se sabe. A ciência consiste em saber; em crer que se sabe reside a ignorância.”

Hipócrates

RESUMO

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) representam um desafio sanitário, ambiental e de saúde pública, ao mesmo tempo em que oferecem uma oportunidade para o aproveitamento energético de seu potencial, possibilitando a geração de energia elétrica e permitindo redução de emissões de gases de efeito estufa. O presente estudo considerou três alternativas para este aproveitamento, conjuntamente com a utilização de energia solar fotovoltaica, aplicadas para o caso de Guaratinguetá, que atualmente utiliza o aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP. A primeira alternativa estudada foi a digestão anaeróbia da Fração Orgânica dos RSU (FORSU) em sistema de biodigestão, com consequente produção de biogás. A segunda alternativa considera a gaseificação de RSU pós-triagem, com produção de *syngas*. Um terceiro cenário, com geração de eletricidade usando biogás, considera o paradigma atual de gestão de RSU na região, em que os RSU são depositados em aterro. Foram conduzidas, considerando os RSU da cidade de Guaratinguetá-SP, análises técnicas, a respeito da geração de energia e produção de hidrogênio por eletrólise utilizando esta energia elétrica proveniente de MCI com biogás, *syngas* e planta fotovoltaica, bem como análise ambiental e econômica, visando a determinação da eficiência ecológica e custos de geração de energia elétrica e hidrogênio, considerando uso para uma frota municipal de caminhões de coleta. Como conclusão tem-se que a digestão anaeróbica da FORSU possibilita uma geração elétrica mais eficiente, técnica e ambientalmente, e com menores custos, do que aquela com *syngas* gerado na gaseificação de RSU. Os indicadores de poluição foram calculados entre 0,179 e 0,227 kgCO_{2eq}/kg_{comb}, respectivamente. A eficiência ecológica mais alta, 85,1%, foi alcançada com geração 100% a biogás e planta fotovoltaica com 100% da potência necessária para a produção de hidrogênio. O menor custo de geração foi alcançado com planta 100% a biogás e planta fotovoltaica com potência de 100% da capacidade para produção de hidrogênio, sendo alcançados 0,54 R\$/kWh no custo de energia, resultando em um custo de 46,9 R\$/kg de hidrogênio.

Palavras-chave: RSU. Geração de energia. Digestão anaeróbia. Gaseificação. Energia solar fotovoltaica.

ABSTRACT

Municipal Solid Wastes (MSW) represent a sanitary, environmental, and public health challenge, at the same time as it offers an opportunity to harness its energy potential, allowing for power generation and reduction in greenhouse gas emissions. The present study considered three alternatives for this use applied to Guaratinguetá, which currently uses the landfill of Cachoeira Paulista – SP, together with the use of photovoltaic solar energy, the first being the anaerobic digestion of the Organic Fraction of MSW (FORSU) in a biodigestion system, with consequent production of biogas. The second alternative considers post-sorting MSW gasification, with syngas production. A third scenario, with electricity generation using biogas, considers the current MSW management paradigm in the region, in which MSW is landfilled. Considering the MSW of the City of Guaratinguetá-SP, technical analyzes were carried out regarding energy generation and hydrogen production by electrolysis using this electrical energy from MCI with Biogas, Syngas and photovoltaic plant, as well as environmental and economic analysis, aiming to determine the ecological efficiency and costs of generating energy and hydrogen, in this case for the municipality, considering use for a strong collection of trucks in the municipality. As a conclusion, the anaerobic digestion of FORSU enables more efficient electricity generation, technically and environmentally, and at lower costs, than that with syngas generated in the gasification of MSW. Pollution indicators were calculated between 0.179 and 0.227 kgCO_{2eq}/kg_{comb}, respectively. The highest ecological efficiency, 85.1%, was achieved with 100% biogas generation and a photovoltaic plant with 100% of the power required for hydrogen production. The lowest generation cost was achieved with a 100% biogas plant and a photovoltaic plant with 100% capacity for hydrogen production, reaching 0.54 R\$/kWh in energy cost, resulting in a cost of 46.9 R\$/kg of hydrogen.

Keywords: MSW. Power Generation. Anaerobic digestion. Gasification. Solar photovoltaics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Prioridades para gestão de RSU.	20
Figura 2 - Destinação dos RSU no Brasil - evolução na última década.	21
Figura 3 - Configuração básica de um aterro sanitário.	28
Figura 4 - Sistema de geração elétrica no aterro sanitário de Caieiras - SP.	30
Figura 5 - Estágios do processo de digestão anaeróbia	30
Figura 6 - Geração de RSU nos municípios que depositam no Aterro Sanitário de Cachoeira Paulista – SP.	34
Figura 7 - Deposições de RSU no aterro sanitário de Cachoeira Paulista - SP.	34
Figura 8 - Composição dos RSU em Guaratinguetá.	35
Figura 9 - Etapas da biodigestão anaeróbia.	36
Figura 10 - Planta de digestão anaeróbia da empresa Valorlis (Portugal).	38
Figura 11 - Fases do processo de gaseificação.	39
Figura 12 - Tipos de gaseificadores de leito fixo e respectivas zonas de reações.	40
Figura 13 - Gaseificadores de leito fluidizado.	41
Figura 14 - Gaseificador do tipo leito fluidizado.	43
Figura 15 - Irradiação solar mensal média em Guaratinguetá – SP.	46
Figura 16 - Distribuição diária da irradiação solar em Guaratinguetá - SP.	47
Figura 17 - Diagrama da matriz energética de RSU analisada.	50
Figura 18 - Cenários analisados para a planta termelétrica.	53
Figura 19 - Diagrama representativo do modelo adotado de aterro sanitário.	54
Figura 20 - Balança de precisão e mufla para análise aproximada de biomassa.	60
Figura 21 - Processo de digestão anaeróbia da FORSU.	64
Figura 22 - Dimensões de um reator anaeróbio.	66
Figura 23 - Separação da FORSU com seus respectivos componentes para produção de biogás.	67

Figura 24 - Sistema gaseificador de RSU.	70
Figura 25 - Sistema de geração de energia elétrica com <i>syngas</i> de RSU e MCI.	71
Figura 26 - Representação do conjunto motor-gerador.	74
Figura 27 - Equivalência entre a irradiação diária (W/m^2) e quantidade de Horas-Sol-Pico (HSP).....	76
Figura 28 - Principais subsistemas considerados nos cálculos envolvendo o eletrolisador. ...	77
Figura 29 - Discriminação do consumo elétrico na produção de hidrogênio.....	86
Figura 30 - Consumos específicos de eletricidade para produção de hidrogênio em função da eficiência da pilha eletrolítica.....	87
Figura 31 - Geração do sistema fotovoltaico e carga, em diferentes configurações de sistema fotovoltaico.....	88
Figura 32 - Necessidade de complementação elétrica em função do dimensionamento da planta FV.....	89
Figura 33 - Preparação de amostra de FORSU para caracterização.....	92
Figura 34 - Relação entre a potência da planta fotovoltaica e o fator de capacidade solicitado à planta termoelétrica.	98
Figura 35 - Produção de biogás - Modelos LandGEM e CETESB.....	100
Figura 36 - Biogás coletado e não coletado.....	100
Figura 37 - Geração de energia elétrica em função da potência disponível.....	101
Figura 38 - Geração de energia elétrica em função da potência - vida útil limitada a 15 anos	102
Figura 39 - Vida útil disponível em função da potência de geração.....	103
Figura 40 - Eficiência ecológica da geração de energia com biogás e <i>syngas</i> em função da eficiência de geração.	105
Figura 41 - Eficiência ecológica com a diferentes proporções de geração com biogás e <i>syngas</i>	106
Figura 42 - Eficiência ecológica de uma planta fotovoltaica tomada isoladamente.	106
Figura 43 - Eficiência ecológica de SHGE completo - Solar e Termoelétrico.....	107

Figura 44 - Custo nivelado de geração elétrica com <i>syngas</i> e biogás - Potência fixa de 100 kW.	108
Figura 45 - Custo de geração com planta completa, variando a potência de pico fotovoltaica, cenário econômico a).....	109
Figura 46 - Custo de geração com planta completa, variando a potência de pico fotovoltaica, cenário econômico b).....	110
Figura 47 - Custo nivelado de produção de hidrogênio com diferentes cenários de geração fotovoltaica e termoelétrica, cenário a).	111
Figura 48 - Custo nivelado de produção de hidrogênio com diferentes cenários de geração fotovoltaica e termoelétrica, cenário b).	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dez maiores empreendimentos de geração com aproveitamento energético de RSU no Brasil.....	26
Tabela 2 - Parâmetros do aterro sanitário de Cachoeira Paulista - SP.	33
Tabela 3 - Fluxos anuais de RSU para o aterro sanitário de Cachoeira Paulista - SP.....	33
Tabela 4 - Composições típicas de Biogás e Gás Natural.....	37
Tabela 5 - Comparativo técnico entre os principais tipos de gaseificadores.	42
Tabela 6 - Paleta de cores da produção de hidrogênio.....	45
Tabela 7 - Cenários de geração termoe elétrica utilizando biogás e <i>syngas</i>	53
Tabela 8 - Composição gravimétrica detalhada dos RSU da cidade de Guaratinguetá -SP....	59
Tabela 9 - Potencial L_0 (m^3/t) relativo a cada componente de FORSU.	59
Tabela 10 - Análise imediata de alguns dos componentes do RSU	61
Tabela 11 - Composição química de alguns componentes dos RSU	62
Tabela 12 - Características dos principais tipos de biodigestores de FORSU.....	65
Tabela 13 - Gaseificação de RSU e composição do <i>syngas</i> obtido.	68
Tabela 14 - Composição em volume e massa do ar.	72
Tabela 15 - Parâmetros de cálculo de custos operacionais e investimento.....	84
Tabela 16 - Parâmetros dimensionais de sistemas fotovoltaicos.	89
Tabela 17 - Parâmetros do motor M50 Cento Series, de 50 kW.....	91
Tabela 18 - Análise aproximada da FORSU e outros resíduos de comparação.....	93
Tabela 19 - Composição adotada de biogás.....	94
Tabela 20 - Propriedades de gases presentes no <i>syngas</i>	94
Tabela 21 - Composição do <i>syngas</i> obtido na gaseificação de RSU.	95
Tabela 22 - Composição dos gases de exaustão na combustão de biogás e <i>syngas</i>	95
Tabela 23 - Parâmetros de eficiência de MCI com combustão de <i>syngas</i> e biogás.....	96

Tabela 24 - Fluxos e dimensionamento de sistemas em três cenários de geração termelétrica, com *syngas* e/ou biogás.97

Tabela 25 - Indicadores de poluição do biogás e *syngas*. 104

LISTA DE SÍMBOLOS

A_e – Relação entre a área instalada de painéis fotovoltaicos e a potência nominal [m^2/kW]

$C_{O\&M}$ – Custos com operação e manutenção em uma planta de geração [R\$]

C_{BoP} – Consumo específico de balanço de carga no eletrolisador [kWh/kg]

E_C – Energia disponibilizada pelo combustível [MJ]

E_{el} – Energia anual gerada por uma planta [kWh]

$E_{g,t}$ – Eletricidade total gerada pelo sistema termoelétrico [kWh]

E_i – Energia parcial (i) gerada em uma planta híbrida [kWh]

$E_{l,c}$ – Consumo elétrico do compressor [kWh]

$E_{l,e}$ – Consumo elétrico do eletrolisador [kWh]

E_l – Consumo elétrico das cargas totais [kWh]

f_o – Fração de Oxidação

Π_g – Indicador de Poluição [CO_{2eq}/PCI]

G_i – Irradiação solar instantânea [kW/m^2]

i – Taxa de juros adotada [%]

k_0 – Taxa de produção de metano

L_0 – Constante de potencial de produção de metano [m^3/t]

m_1 – Massa inicial de resíduo na análise imediata, pré-secagem [g]

m_2 – Massa inicial de resíduo na análise imediata, pós-secagem [g]

m_3 – Massa inicial de resíduo na análise imediata, pós-pirólise [g]

m_C – Massa de combustível consumida [kg]

$m_{c,s}$ – Vazão mássica de *syngas* na saída do gaseificador [kg/h]

$m_{r,s}$ – Vazão mássica de entrada de resíduos no gaseificador [kg/h]

m_{Ar} – Vazão de ar no gaseificador [kg/h]

m_{bc} – Vazão de biogás coletado [t/ano]

m_{be} – Vazão de biogás perdido para a camada de cobertura [t/ano]

m_{bio} – Vazão mássica de biogás produzido no reator [kg/dia]

m_{bt} – Vazão total de biogás gerado no aterro [t/ano]

$m_{c,1}$ – Fluxo de combustível para o MCI 1 [kg/s]

$m_{c,2}$ – Fluxo de combustível para o MCI 2 [kg/s]

M_{cz} – Vazão de saída de cinzas do gaseificador [kg/h]

M_n – Massa de RSU aceita no aterro sanitário [t/ano]

P_1 – Pressão de saída do compressor [bar]

P_2 – Pressão de saída do compressor [bar]

$P_{c,s}$ – Potência de gaseificação [kW]

P_e – Potência da pilha do eletrolisador [kW]

$P_{fv,i}$ – Potência instantânea de geração do sistema fotovoltaico [kW]

$P_{g,fv}$ – Potência de pico do sistema solar fotovoltaico [kW]

$P_{g,t}$ – Potência elétrica do sistema termoeletrico [kW]

$P_{l,e}$ – Potência elétrica total consumida pelo eletrolisador [kW]

Q – Vazão de efluente de suspensão para o reator anaeróbio [m³/dia]

Q_A – Vazão de biogás efetivamente produzido no aterro sanitário [t/ano]

Q_{CH_4} – Vazão de metano coletado no aterro [t/ano]

Q_{col} – Vazão de biogás coletado no aterro sanitário [t/ano]

ST – Teor de sólidos totais [%]

SV – Teor de Sólidos voláteis [%]

T – Ano de deposição do RSU no aterro [ano]

T_1 – Temperatura de entrada do hidrogênio no compressor [K]

t_h – Tempo de funcionamento do sistema [h/dia]

V_c – Volume da campânula do tanque do reator anaeróbio [m³]

V_g – Volume do tanque do reator anaeróbio [m³]

LISTA DE ABREVIATURAS

ACV – Análise de Ciclo de Vida

DA – Digestão Anaeróbia

FC – Fator de Capacidade

FORSU – Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos

GEE – Gases de Efeito Estufa

HSP – Horas-de-Sol-a-Pico

LCOE – Levelized Cost of Energy

MCI – Motor a Combustão Interna

MP – Material Particulado

PEM – Proton Exchange Membrane

PCI – Poder Calorífico Inferior [MJ/kg]

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SOFC – Solid Oxide Fuel Cell

SHGE – Sistema Híbrido de Geração de Energia

SOE – Solid Oxide Electrolyzer

SOFC – Solid Oxide Fuel Cell

SPCH – Sistema de Produção e Compressão de Hidrogênio

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

TRH – Tempo de Retenção Hídrica

WtE – Waste-to-Energy

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

α – Excesso de ar na mistura ar-combustível [%]

ε – Eficiência Ecológica [%]

ε_H – Eficiência Ecológica da planta híbrida [%]

ε_i – Eficiência ecológica parcial (i) de uma planta híbrida [%]

Π_g – Indicador de Poluição [$\text{CO}_2\text{eq}/\text{PCI}$]

γ_{Comb} – Fator de conversão de eficiência do MCI [–]

η_{bio} – Taxa de conversão de sólidos voláteis em biogás no reator [m^3/t]

η_{col} – Eficiência do sistema de coleta de biogás de aterro [%]

η_{comp} – Eficiência elétrica do compressor [%]

η_e – Eficiência da pilha eletrolítica [%]

η_{el} – Eficiência de geração elétrica do MCI [%]

η_{frio} – Eficiência a gás frio do gaseificador

η_G – Eficiência do gerador elétrico [%]

η_{MCI} – Eficiência do MCI [%]

η_g – Eficiência de conversão da planta [%]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS E JUSTIFICATIVA	19
1.2	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	22
1.3	OBJETIVOS.....	23
1.3.1	Objetivos gerais.....	23
1.3.2	Objetivos específicos.....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU.....	25
2.2	TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU	27
2.3	ATERROS SANITÁRIOS COM CAPTAÇÃO DE BIOGÁS	28
2.4	DIGESTÃO ANAERÓBIA DE FORSU.....	35
2.5	GASEIFICAÇÃO DE RSU.....	38
2.6	SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA (SHGE)	43
2.7	HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO	44
2.7.1	Hidrogênio verde.....	45
2.8	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	46
3	METODOLOGIA	49
3.1	ANÁLISE TÉCNICA.....	50
3.1.1	MATRIZ ENERGÉTICA DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU ...	51
3.1.2	Principais cenários analisados	52
3.1.3	Digestão anaeróbia da FORSU.....	53
3.1.4	Gaseificação de RSU.....	68
3.1.5	Produção de hidrogênio.....	76
3.2	ANÁLISE AMBIENTAL.....	79

3.2.1	Eficiência ecológica	79
3.2.2	Emissões de dióxido de carbono equivalente (CO _{2e})	80
3.2.3	Eficiência Ecológica.....	81
3.2.4	Eficiência ecológica de um Sistema Híbrido de Geração Elétrica (SHGE).....	81
3.3	ANÁLISE ECONÔMICA.....	82
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	85
4.1	RESULTADOS DA ANÁLISE TÉCNICA.....	85
4.1.1	Produção de hidrogênio com energia solar fotovoltaica	85
4.1.2	Sistema solar fotovoltaico	87
4.1.3	Geração de eletricidade com SHGE solar-biogás- <i>syngas</i>	90
4.1.4	Combustão de <i>Syngas</i> e Biogás em MCI	95
4.1.5	Planta termelétrica completa	96
4.1.6	Produção de biogás no aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP	98
4.1.7	Potencial de geração de eletricidade no aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP 101	
4.2	Resultados da análise ambiental.....	103
4.2.1	Eficiência ecológica	104
4.3	Resultados da análise econômica	107
4.3.1	Custos de geração da energia elétrica.....	108
4.3.2	Custos de produção do hidrogênio	110
5	CONCLUSÕES	113
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	113
	REFERÊNCIAS	117

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E JUSTIFICATIVA

No ano de 2022 no Brasil foram produzidos por dia 224 mil toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), o que equivale a 1,043 kg/habitante/dia (ABRELPE, 2022). Desse total, 93% foram efetivamente coletados. Aproximadamente 40% dos RSU coletados em 2018 foram depositados inadequadamente em lixões ou em aterros controlados, enquanto 46,1% fizeram a deposição final em aterros sanitários (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2022).

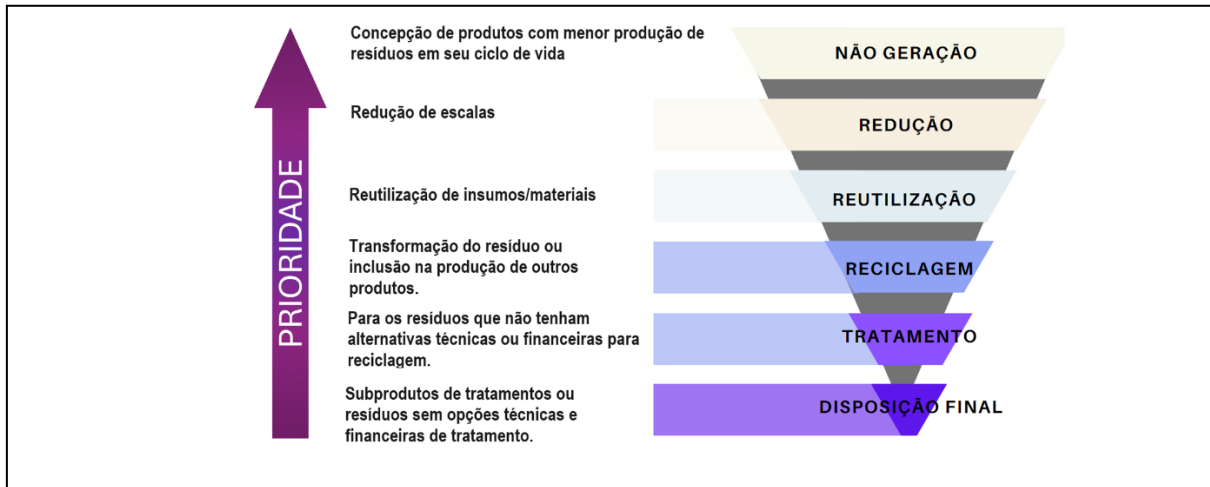
Quando não gerenciados adequadamente, os RSU podem ocasionar diversos problemas ambientais, como poluição dos lençóis aquáticos com chorume e metais pesados, além da emissão de metano na atmosfera (FERRAZ DE CAMPOS et al., 2021a), cujo potencial de aquecimento global é ao menos 25 vezes superior ao do dióxido de carbono (YAMAN; ANIL; ALAGHA, 2020).

Mesmo quando são depositados em aterros sanitários, como acontece na maioria das vezes, grande parte do material reciclável é perdida, tornando-se praticamente irrecuperável. Nos aterros sanitários, além das devidas proteções ao solo, com drenagem e tratamento do chorume, costuma-se haver uma captura e combustão do biogás produzido pela decomposição anaeróbia do material orgânico contido nos RSU. Na maior parte das vezes, esta combustão é feita por meio de *flares*, sem aproveitamento energético.

O gerenciamento de RSU no Brasil é orientado pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010). Os fundamentos desta lei têm como objetivo promover o desenvolvimento sustentável, fomentar a responsabilidade compartilhada e reconhecer os resíduos sólidos como um recurso econômico que gera emprego e renda.

O Art. 9º da PNRS afirma que, na gestão de RSU, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e, por último, disposição final de forma ambientalmente adequada. Essa ordem de prioridades no gerenciamento de RSU é mostrada na **Figura 1**.

Figura 1 - Prioridades para gestão de RSU.



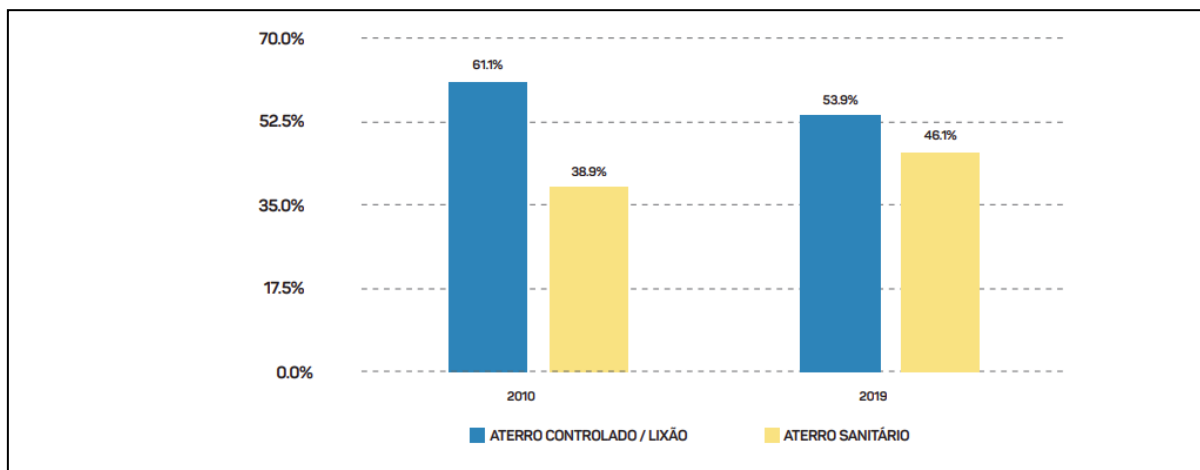
Fonte: Adaptado de UFPel (2023).

Por tratamento de RSU entende-se processos que culminem em materiais mais seguros ambientalmente, ou inertes, podendo ser aproveitados em usos finais como adubo ou matérias primas em geral. Entre as formas de tratamento, incluem-se a compostagem, a digestão anaeróbia, a incineração, a pirólise e a gaseificação. Entende-se, portanto, que o tratamento de RSU com aproveitamento energético pode ser priorizado em relação à disposição final.

Contudo, apesar do aparato legal que prevê o desenvolvimento de alternativas para a destinação dos RSU, a maior parte dos municípios brasileiros ainda sequer é capaz de destinar seus resíduos em instalações apropriadas. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2022), em 2019 53,9% dos municípios ainda destinavam seus resíduos em aterros controlados ou lixões a céu aberto. Na **Figura 2** é mostrada a evolução na última década em relação à destinação de RSU nos municípios brasileiros.

Há, portanto, um desafio maior em relação à necessidade de ampliação da coleta de RSU bem como destinação adequada, com a necessária disponibilização de aterros sanitários. Uma vez que a coleta seja disponibilizada e a estrutura adequada para a disposição dos RSU esteja em operação, a reciclagem e o tratamento de resíduos passam a figurar como possibilidades prioritárias para o efetivo gerenciamento de resíduos.

Figura 2 - Destinação dos RSU no Brasil - evolução na última década.



Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2022).

Contudo, a destinação em aterro sanitário, cuja plena abrangência ainda não foi alcançada no Brasil, possui um problema característico que são as emissões por fugas de biogás, implicando em significativas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2023), para cada 1000 toneladas de resíduos de alimentos depositados em aterros, estima-se que sejam liberadas 34 toneladas de emissões fugitivas de metano, equivalentes a 838 tCO_{2e}. Uma redução de 50% nos resíduos de alimentos depositados em aterros em 2015 poderia ter diminuído as emissões acumuladas de metano em aproximadamente 77 milhões de toneladas de equivalente de dióxido de carbono (tCO_{2e}) até 2020, em comparação com o cenário padrão.

Entre as alternativas de tratamento de RSU, que poderiam ser adotadas ao evitar a deposição em aterros, a valorização energética compreende o aproveitamento de seu conteúdo energético, com a geração de eletricidade, calor ou ainda a produção de combustíveis. Assim, a energia química disponível nos resíduos pode ser aproveitada, sendo convertida em calor, tração ou eletricidade. Tal forma de aproveitamento tem sido estudada e aplicada em diversos países, sendo usualmente chamada de Waste-to-Energy (WtE).

Neste sentido, o presente trabalho se propôs a estudar alternativas para o aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos para a geração de energia elétrica. Diversos estudos focaram na análise de alternativas ou tecnologias isoladamente para gerar energia a partir de resíduos. Notou-se, portanto, uma necessidade de se analisar esta possibilidade de forma mais abrangente, considerando o panorama atual de gestão de RSU no Brasil, em que a destinação na maioria das vezes é, na melhor das hipóteses, o aterramento sanitário.

Propõe-se de forma inédita um conjunto de análises que, partindo de um caso aplicado, avalia a geração de eletricidade a partir da gaseificação e biodigestão anaeróbia, de forma a complementar a geração proveniente de uma planta fotovoltaica. O objetivo dessas gerações combinadas é suprir energeticamente um sistema de produção de hidrogênio por eletrólise.

Por meio de metodologias específicas procurou-se compreender o comportamento dessas fontes de energia em diferentes cenários. Junto a isso, uma etapa experimental compreendeu analisar uma amostra de resíduo alimentar, no sentido de determinar o potencial de produção de biogás deste resíduo, encarando-o como uma fração importante da parte biodegradável dos RSU. Buscou-se, por fim, os custos de geração de energia e produção de hidrogênio a partir de eletricidade derivada de RSU, algo ainda pouco explorado na literatura.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Capítulo 1- Introdução

Neste capítulo são apresentados os conceitos iniciais e justificativa deste trabalho, bem como seus objetivos gerais e específicos. É mostrado um panorama a respeito da gestão de RSU no Brasil.

Capítulo 2- Revisão bibliográfica

Neste capítulo é apresentado um levantamento bibliográfico a respeito dos principais temas abordados, como a gestão de RSU e tecnologias para seu aproveitamento energético, com destaque para a gaseificação dos RSU, com produção de gás de síntese (*syngas*) e biodigestão anaeróbia da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU), com produção de biogás e geração de energia elétrica. É apresentada também uma breve revisão a respeito do hidrogênio verde.

Capítulo 3- Metodologia

Neste capítulo são elencados e abordados os métodos de cálculo, com equações e relações entre as grandezas envolvidas. A análise técnica contempla a determinação das quantidades e relações ocorridas nas conversões e transferências de massa e energia. A análise ambiental inclui o cálculo da eficiência ecológica da geração elétrica nos cenários adotados. Por fim, é apresentada uma análise econômica, que visa determinar os custos de geração de energia elétrica e produção de hidrogênio.

Capítulo 4- Resultados e discussão

São apresentados os resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia apresentada. As análises técnicas, ambientais e econômicas resultam em valores em termos dos diferentes cenários considerados.

Capítulo 5- Conclusões

Com base nos resultados são apresentadas as conclusões do presente trabalho, fazendo relações e apresentando um panorama geral dos resultados. São verificados se os objetivos foram alcançados e apresentam-se sugestões para trabalhos futuros.

1.3 OBJETIVOS

De forma sucinta, são apresentados nesta sessão os objetivos específicos e gerais do presente trabalho.

1.3.1 Objetivos gerais

O objetivo geral deste trabalho é analisar de forma integrada alternativas sustentáveis para o aproveitamento do potencial energético presente nos RSU, considerando um caso de aplicação na região de abrangência do aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP, visando tratamento alternativo em relação ao aterro, de forma econômica, e promovendo a integração com outras fontes renováveis, especificamente, a solar fotovoltaica.

1.3.2 Objetivos específicos

1) Avaliar a complementação de geração solar fotovoltaica com energia gerada em planta termoeletrica alimentada com *syngas* e biogás derivados de RSU.

2) Calcular potenciais de geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro sanitário, de acordo com as estimativas de produção de biogás.

3) Determinar relações entre quantidades de RSU processados, energia elétrica e hidrogênio produzido, considerando digestão anaeróbia e gaseificação.

4) Realizar análises ambientais, a partir do cálculo da eficiência ecológica da geração com biogás e *syngas*, derivados de RSU, em conjunto com a geração fotovoltaica.

5) Determinar custos de geração de eletricidade e produção de hidrogênio com eletrólise, considerando o uso de fontes termoelétrica a biogás e/ou *syngas* e fotovoltaica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU

Segundo Kumar e Samadder (2017), os RSU podem ser tratados por meio de dois principais tipos de processos: a conversão termoquímica e a conversão biológica. As técnicas de conversão termoquímicas são úteis em resíduos secos e envolve tratamento térmico dos RSU com finalidade de se obter calor (como a incineração) ou mesmo outros combustíveis (gaseificação, que gera o combustível *syngas*). As técnicas de conversão biológica envolvem a decomposição microbiológica do conteúdo orgânico dos RSU e o principal processo é a digestão anaeróbia, que tem como produtos o biogás e biofertilizante. A digestão anaeróbia é também o processo envolvido com a produção de biogás nos aterros sanitários.

Barros, Filho e da Silva (2014), estudaram o potencial de geração elétrica do biogás de aterro sanitário no Brasil e concluíram que a geração elétrica é atrativa em cidades com população acima de 200.000 habitantes, onde foi verificada uma Taxa Interna de Retorno (TIR) igual ou maior que 10%. Da Silva et. al (2018) calculou o potencial de geração de energia elétrica por biogás de aterro e digestão anaeróbia do esgoto para a cidade de Itajubá – MG e concluíram que é possível atender cerca de 10% da demanda elétrica da cidade.

Com relação ao potencial brasileiro de geração de biogás de resíduos, Silva dos Santos et al. (2018) calculou que, contando resíduos urbanos e agropecuários, é possível uma potência instalada entre 4.5 e 6.9 GW, ou seja, 4.9% da potência do parque gerador atual do Brasil. Aproximadamente 60% deste potencial viria das fezes bovinas, seguida pelos RSU e pelo esgoto sanitário.

Estes estudos consideram a utilização de tecnologia convencional para o aproveitamento do biogás, com motores de combustão interna ou microturbinas acopladas a geradores. Neste patamar tecnológico se encontram plantas já em funcionamento no Brasil.

Especificamente no caso de plantas geradoras a partir de biogás derivado de RSU, o Brasil dispõe atualmente de um crescente parque de usinas geradoras. De acordo com o SIGA – Sistema de Informações de Geração da ANEEL (2023), atualmente este tipo de usina compreende potência total instalada de 226 MW. O porte e localização dos dez maiores empreendimentos, em termos de potência de geração, são mostrados na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Dez maiores empreendimentos de geração com aproveitamento energético de RSU no Brasil.

Nome do Empreendimento	Potência (MW)	Cidade	UF
Termoverde Caieiras	29,55	Caieiras	SP
Asja Jaboaão	28,52	Jaboaão dos Guararapes	PE
São João Biogás	24,64	São Paulo	SP
Salvador	19,73	Salvador	BA
Nova Iguaçu	16,93	Nova Iguaçu	RJ
Biotérmica Recreio	12,74	Minas do Leão	RS
Curitiba Energia	9,98	Fazenda Rio Grande	PR
Asja Sabará	7,13	Sabará	MG
Guatapar	5,70	Guatapar	SP
Tecipar	5,70	Santana de Parnaíba	SP

Fonte: SIGA – Sistema de Informaes de Gerao da ANEEL (2023)

Verifica-se assim uma concentrao das maiores plantas geradoras na região sudeste. Considerando o total de plantas deste tipo em operao no Brasil, o estado de São Paulo corresponde a 39,5% da potência total de 226 MW, seguido por Rio de Janeiro (24,3%) e Minas Gerais (8,6%).

De acordo com o Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO, 2004), a produo de energia através da utilizao de biogás proveniente de RSU traz benefícios para a sustentabilidade econômica do saneamento urbano. Essa prática  viável apenas em locais onde a gestão de aterros e estaoes de tratamento de esgoto  eficiente, tornando-se, assim, um estímulo adicional para a melhoria do gerenciamento de RSU.

Ainda segundo o CENBIO (2004), a gerao de energia elétrica a partir de biogás derivado de RSU traz benefícios sociais, como a criao de empregos, gerao distribuída próxima aos pontos de carga, além da colaborao para a viabilidade econômica do saneamento básico. Prefeituras têm podem obter receita extra ao vender a energia gerada com biogás às concessionárias. Além disso, os gerenciadores de RSU se beneficiam com a reduo da eletricidade adquirida da concessionária e a possibilidade eventual de vender eletricidade  rede. Por fim, vantagens ao meio ambiente ao reduzir as emissões de metano na atmosfera e diminuir o consumo de combustíveis fósseis.

Segundo Mukherjee (2020) nos EUA existem atualmente 86 plantas de geração a partir de RSU que, em sua maioria, utilizam de queima em massa do lixo ou então da combustão de um combustível derivado do lixo, composto por subprodutos selecionados de acordo com seu Poder Calorífico Inferior (PCI). Trata-se de uma tecnologia semelhante à da queima do carvão mineral. Contudo, já existem em caráter experimental plantas com processos de gaseificação do resíduo urbano, com produção de *syngas*, que pode ser queimado em motores convencionais.

2.2 TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU

Diversos outros artigos, como os de Ayodele (2017), Kumar (2017), Kalyani (2014) e Zhao (2018) analisam opções para aplicação de tecnologia WtE especificamente para países em desenvolvimento.

Entre as tecnologias utilizadas em processos termoquímicos, destacam-se a gasificação, cujo principal produto de utilidade energética é o *syngas*, composto principalmente por moléculas de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂). Neste caso, o *syngas* pode ser convertido por meio de Células a combustível de óxido sólido (SOFC), gerando eletricidade em corrente contínua, dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O).

O uso do metano proveniente da digestão anaeróbia tem sido estudado considerando a combustão em turbinas a gás (SUNG; KIM; KIM, 2017), Motor a Combustão Interna (MCI) (QIAN et al., 2017) e células a combustível (SAADABADI et al., 2019).

Alguns trabalhos recentes têm se dedicado ao estudo da aplicação de SOFC alimentadas por *syngas* proveniente de resíduos. Huang e Turan (2019) propõem a otimização de um sistema híbrido SOFC e turbina a gás para geração de eletricidade por meio de *syngas* gerado por gaseificação de resíduos orgânicos. Braga et al. (2014) comparam a geração de eletricidade em SOFC com motor de combustão interna acoplado a gerador e os resultados mostraram que a eficiência exergética do Motor de Combustão Interna foi de 22% e para as células de combustível do tipo Proton Exchange Membrane (PEM) foi de 40%.

Mayer, Bhandaria e Gäth (2019) estudaram aspectos ambientais de tecnologias Waste-to-Energy por meio de Análise de Ciclo de Vida (ACV). Em seu trabalho, foram revisados artigos que realizaram ACV de plantas de geração de eletricidade com as tecnologias de carbonização hidrotérmica, gaseificação, digestão anaeróbia e pirólise, com relação ao seu potencial de aquecimento global e acidificação. A principal conclusão neste trabalho foi que a

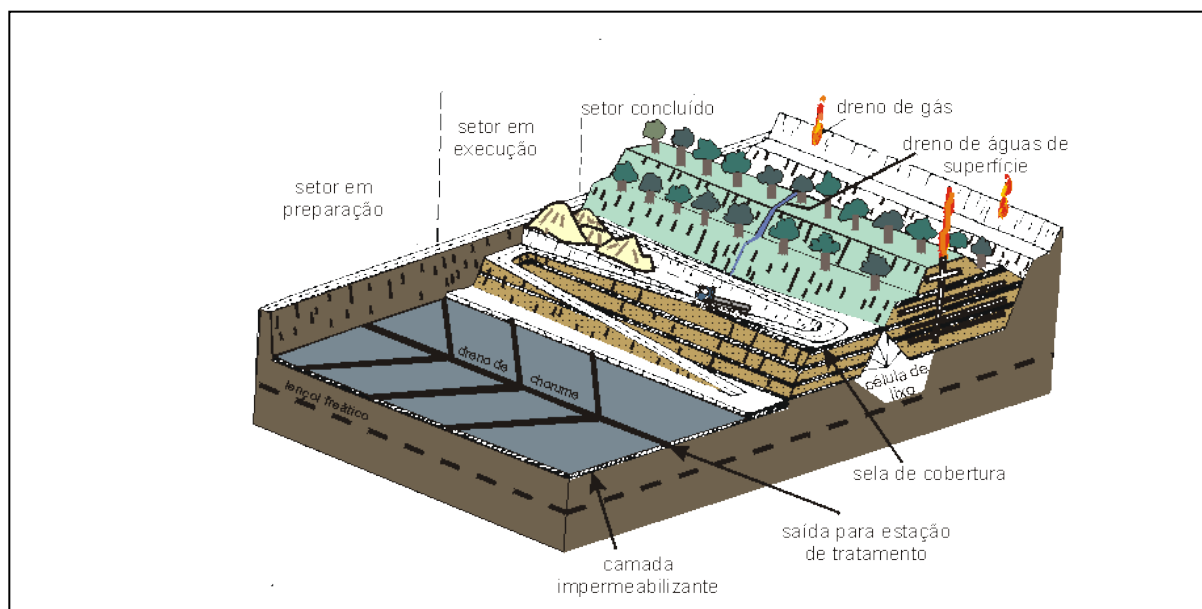
digestão anaeróbica e a gaseificação pareciam superar a incineração no processo de conversão de resíduos, no aspecto ambiental.

2.3 ATERROS SANITÁRIOS COM CAPTAÇÃO DE BIOGÁS

Um aterro sanitário pode ser entendido como uma área projetada e construída para receber, de forma controlada, os resíduos sólidos urbanos e industriais que não podem ser reciclados ou reutilizados. O objetivo principal é promover a degradação biológica e a estabilização dos resíduos, reduzindo ao máximo os riscos à saúde e ao meio ambiente.

Ao conceber um aterro sanitário, vários elementos são considerados. A seleção criteriosa do local é fundamental, levando em conta aspectos como distância de áreas urbanas, recursos hídricos, solo, topografia e características geológicas. Além disso, a concepção e a operação do aterro devem seguir normas técnicas e regulamentos ambientais para garantir a segurança e a sustentabilidade do empreendimento. Na **Figura 3** são mostrados alguns dos principais elementos de um aterro sanitário.

Figura 3 - Configuração básica de um aterro sanitário.



Fonte: (REIS, 2001)

Segundo Reis (2001) uma das principais características de um aterro sanitário é a impermeabilização da base e das laterais, utilizando materiais como argila compactada ou geomembranas, a fim de se evitar a contaminação tanto do solo como das águas subterrâneas. Também são instalados sistemas de drenagem e tratamento dos efluentes gerados pelos

resíduos, bem como sistemas de coleta e tratamento dos gases provenientes da decomposição orgânica.

Os aterros sanitários geralmente possuem uma configuração composta por três setores principais: preparação, execução e conclusão. Alguns aterros realizam simultaneamente esses setores em várias áreas, enquanto outros de menor porte desenvolvem cada setor sequencialmente.

Na fase de preparação da área, são realizadas atividades como a impermeabilização e nivelamento do terreno, construção de sistemas de drenagem para captar o chorume (ou percolado) e encaminhá-lo para tratamento, além da criação de vias de circulação. É importante cercar as áreas adjacentes ao aterro com vegetação viva para evitar ou reduzir odores e a poluição visual.

Durante a fase de execução, os resíduos são separados e depositados de acordo com suas características. Antes de serem depositados, todos os resíduos são pesados para acompanhar a quantidade suportada pelo aterro. Resíduos que produzem percolado são geralmente revestidos com uma camada selante.

Quando um setor do aterro atinge sua capacidade de receber resíduos, ele é revegetado e os resíduos passam a ser depositados em outro setor. Durante todo o processo de disposição e mesmo após a conclusão de um setor, os gases resultantes da decomposição do lixo devem ser queimados e os percolados devem ser coletados. Além disso, obras de drenagem para lidar com águas pluviais também devem ser realizadas.

Os setores concluídos devem passar por um monitoramento contínuo e permanente para avaliar a eficácia das obras de coleta de percolados, o sistema de queima de gases e o sucesso da revegetação (REIS, 2001).

O biogás produzido em um aterro sanitário é captado por uma rede de coleta, composta por uma tubulação que percorre as células do aterro. De todo modo, este gás não pode ser emitido diretamente na atmosfera sem antes ter seu metano destruído em combustão, seja por meio de flares, ou então para ser aproveitado para geração de eletricidade ou ainda aproveitado após tratamento para comercialização do biometano. Na **Figura 4** é mostrado o sistema de geração de eletricidade a partir de biogás na usina termoelétrica Termoverde, do aterro sanitário de Caieiras - SP.

Figura 4 - Sistema de geração elétrica no aterro sanitário de Caieiras - SP



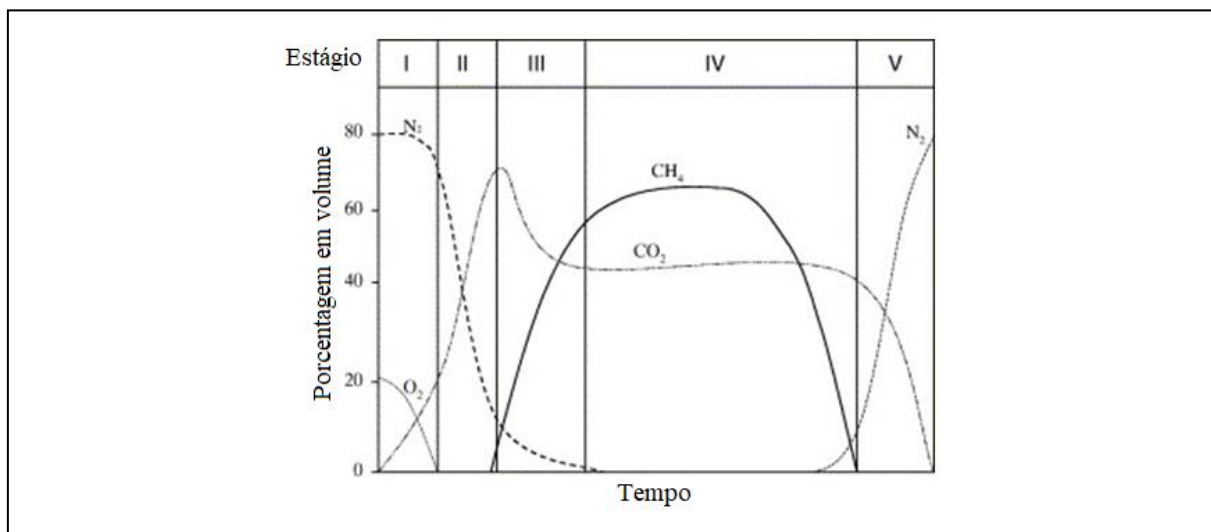
Fonte: Adaptado de Candiani (2020).

Na **Figura 4a)** observam-se os componentes do sistema de geração elétrica. 1- Final da tubulação de coleta do biogás, 2-Sistema de sucção e filtragem de condensados, 3-Grupo de motogeradores ciclo Otto (MCI), 4-Subestação de elevação e conexão à rede elétrica de alta tensão. Na figura **Figura 4b)** é mostrado uma parte do grupo de motogeradores.

2.3.1.1 Produção de biogás em aterro sanitário

No interior do aterro, a FORSU é decomposta por micro-organismos em ambiente anaeróbio. O processo ocorre em cinco estágios. Como cada célula do aterro é compactada e fechada após o seu preenchimento completo, o processo de biodigestão é descontinuado, iniciando uma quinta fase, denominada maturação, em que ocorre a depleção do substrato e a consequente redução dos níveis de CO_2 e CH_4 gerados. Estas fases são mostradas na **Figura 5**:

Figura 5 - Estágios do processo de digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Bove e Lunghi (2006).

Como é observado na **Figura 5**, inicialmente o processo ocorre com uma degradação aeróbia do substrato contido na FORSU, com elevação da concentração de CO₂. Após a queda da oxigenação do ambiente da célula, o processo passa a ocorrer de forma anaeróbia, com aumento da produção de CH₄. Por fim, um estado biologicamente inerte é alcançado, notando-se a presença de nitrogênio em concentração atmosférica.

2.3.1.2 Condições para a geração de biogás em um aterro sanitário

A produção de biogás em um aterro sanitário é afetada por diversos elementos, tais como a composição e tipo dos resíduos, o nível de umidade, a presença de nutrientes, a densidade do material depositado, a temperatura e o pH, a oxigenação no aterro e o tempo de deposição dos RSU. Os principais fatores são (AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY, 2001):

Composição de resíduos: Maiores quantidades de biogás são geradas quando mais resíduos orgânicos são decompostos. Estes incluem resíduos de cozinha e uma fração de resíduos alimentares e de jardinagem. Por outro lado, resíduos não biodegradáveis consistindo principalmente de detritos de materiais biologicamente inativos como concreto, metal, plástico e vidro resultam na geração de muito pouco ou nenhum biogás (PURMESSUR; SURROOP, 2019).

Idade do resíduo: Mais gás é produzido a partir de resíduos recentes enterrados em um período de menos de 10 anos por meio de decomposição bacteriana, volatilização e reações químicas, em vez de resíduos mais antigos que foram enterrados por mais de 10 anos. O máximo de biogás é geralmente gerado de 5 a 7 anos após a deposição do resíduo.

Nutrientes: A produção de biogás aumenta devido a certos nutrientes como potássio, sódio, magnésio e cálcio que estão presentes em resíduos orgânicos que estimulam o crescimento de bactérias. No entanto, alguns compostos, como o sal, podem ser prejudiciais para as bactérias, dificultando assim a geração de biogás.

Teor de umidade: A maior quantidade de gás é produzida quando (com base no peso úmido do resíduo) o nível de umidade é de cerca de 40% ou mais, pois este último carrega os nutrientes e as bactérias por todo o aterro. Além disso, a formação de gás é retardada quando os resíduos são compactados, pois isso leva a um aumento na densidade dos constituintes do aterro, dificultando a penetração da água nos resíduos.

Temperatura: As atividades bacterianas são induzidas com o aumento da temperatura, aumentando assim a taxa de geração de biogás. A volatilização, bem como as reações químicas, também é desencadeada sob temperaturas mais altas.

Oxigênio no aterro: O metano é gerado por bactérias anaeróbicas apenas quando o oxigênio no aterro é esgotado pelas bactérias aeróbicas. Conseqüentemente, a disponibilidade de oxigênio diminuirá a taxa de formação de metano.

2.3.1.3 Aterro sanitário de Cachoeira Paulista

De acordo com o parecer técnico da CETESB (2010), o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP apresenta o mesmo com capacidade para recebimento de 1000 t/dia de resíduos sólidos Domiciliares e Industriais (resíduos de varrição, restaurante, refeitório, escritórios, entre outros) Classe IIA (não perigosos e não inertes) gerados em municípios da região do Vale do Paraíba.

Tendo suas operações iniciadas em 2006, o empreendimento é localizado em gleba de 237.367 m² denominada Fazenda São João, situada a aproximadamente 7 km da área urbana do núcleo urbano de Cachoeira Paulista. O projeto de ampliação do aterro previa a execução de sua operação em 9 fases e projetado para receber 15 camadas de resíduos sólidos de 5 m cada.

A estimativa da capacidade total de disposição é de 4.457.665 m³ de lixo compactado, com cobertura diária dos resíduos usando camadas de 0,30 m de solo argiloso compactado. No parecer da CETESB consta a proposta de instalação dos seguintes sistemas de proteção ambiental: impermeabilização superior e subsuperficial, drenagens, queima de gases, drenagens superficiais e subsuperficiais, remoção do percolado e cortina vegetal.

Na **Tabela 2** são resumidas as especificações técnicas do Aterro Sanitário de Cachoeira Paulista – SP.

Tabela 2 - Parâmetros do aterro sanitário de Cachoeira Paulista - SP.

Parâmetros	Valor	Observações
Área do aterro (ha)	24	-
Área de deposição (ha)	13,3 (inicial) 14,4 (final)	-
Capacidade de recebimento (t/dia)	90	Ampliado para 1000 em 2008.
Vida útil total (anos)	107	Mínimo de 10 anos.

Fonte: Com dados de Aguiar (2019).

O histórico de recebimento de fluxos de RSU entre 2006 e 2021 foi obtido no Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos (CETESB, 2021) e são mostrados na **Tabela 3**.

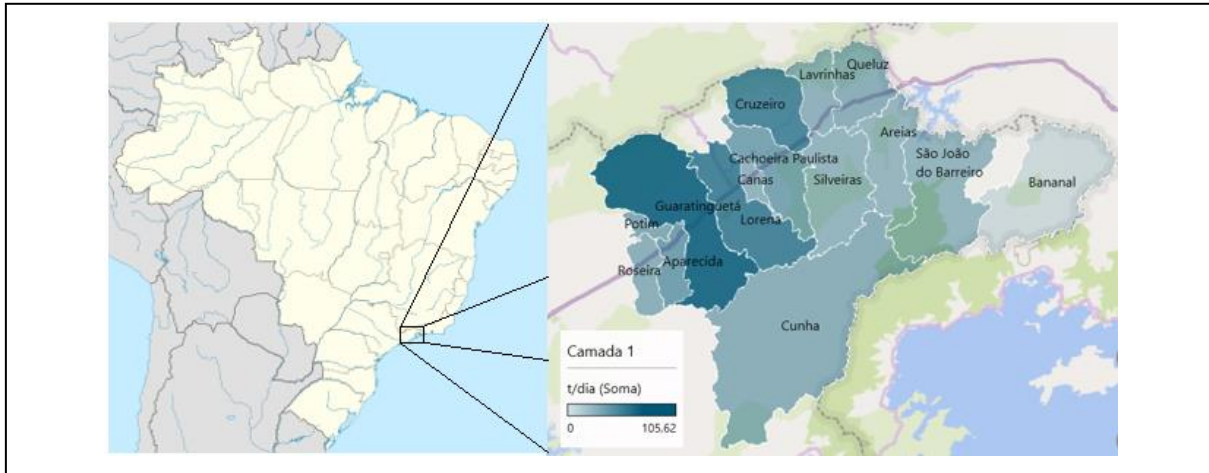
Tabela 3 - Fluxos anuais de RSU para o aterro sanitário de Cachoeira Paulista - SP.

Ano	Guaratinguetá	Lorena	Cruzeiro	Cachoeira Paulista	Aparecida	Outras	t/dia	t/ano
0 2006	53,7	32,2				2,5	88,4	32 266
1 2007	54,4	32,6				2,6	89,6	32 704
2 2008	53,6	31,7		10,8		15,1	111,2	40 588
3 2009	53,9	31,9		11,0		28,4	125,2	45 698
4 2010	53,4	32,1	30,0	9,8		23,2	148,5	54 203
5 2011	53,7	32,2	30,1	9,9	13,8	23,5	163,2	59 568
6 2012	54,0	32,3	30,2	10,0	13,8	24,9	165,3	60 316
7 2013	100,9	67,7	62,7	20,8	28,5	45,6	326,1	119 034
8 2014	101,5	67,4	63,0	20,9	28,6	46,1	327,4	119 501
9 2015	102,1	67,7	63,2	21,1	28,6	46,5	329,2	120 158
10 2016	102,7	68,1	63,5	21,3	28,6	47,0	331,0	120 815
11 2017	103,2	68,4	63,7	21,4	28,6	49,2	334,6	122 114
12 2018	103,8	68,6	68,4	21,6	28,5	50,1	340,9	124 425
13 2019	104,4	68,9	64,1	21,8	28,5	44,7	332,4	121 326
14 2020	105,0	69,3	64,4	21,9	28,5	50,9	340,0	124 093
15 2021	105,6	69,6	64,6	22,1	28,6	51,3	341,8	124 757

Ao todo, ao longo da operação, o aterro recebeu RSU de 15 municípios da região do Vale do Paraíba, sendo Guaratinguetá, Lorena, Cruzeiro, Aparecida e Cachoeira Paulista as cidades com maior volume de deposição no aterro, enquanto as outras cidades são Areias, Bananal, Canas, Cunha, Lavrinhas, Queluz, Potim, Roseira, São José do Barreiro e Silveiras. Os dados são apresentados em t/dia e convertidos para t/ano.

Na **Figura 6** é ilustrada a distribuição geográfica da geração de RSU na região atendida pelo aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP.

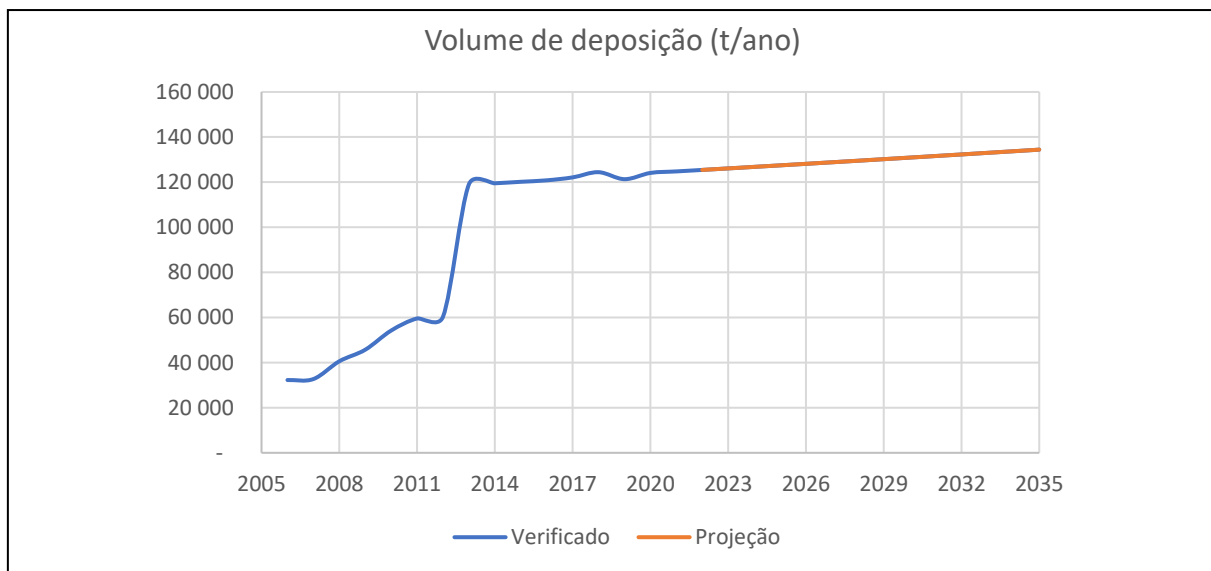
Figura 6 - Geração de RSU nos municípios que depositam no Aterro Sanitário de Cachoeira Paulista – SP.



Fonte: Elaboração Própria.

Considerando uma vida útil estimada em 30 anos, portanto, com encerramento em 2035, uma projeção de volume de RSU depositado é feita com o crescimento médio de 5,34% ao ano entre 2013 e 2021, começando no ano em que se verifica estabilização dessa taxa. Tal projeção é mostrada na **Figura 7**.

Figura 7 - Deposições de RSU no aterro sanitário de Cachoeira Paulista - SP.



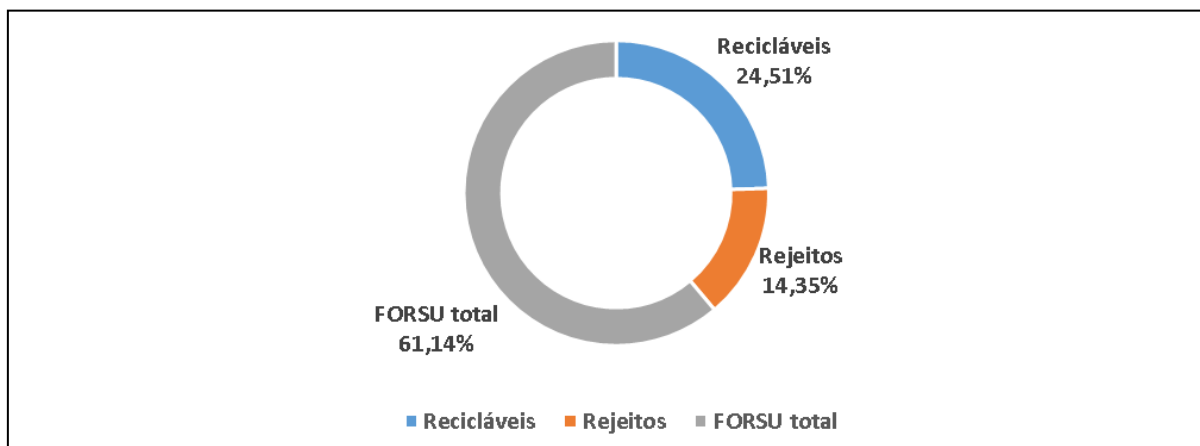
O Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) de Guaratinguetá, lançado em 2019 (PREFEITURA MUNICIPAL DA ESTÂNCIA TURÍSTICA DE GUARATINGUETÁ/SP, 2019) descreve a gestão de RSU aplicada no município, que é usuário do aterro sanitário de Cachoeira Paulista, atendendo com o serviço de coleta uma

população de 118 mil habitantes. Sua produção de RSU é de 106 toneladas por dia, totalizando cerca de 0,90 kg de RSU por habitante. Desse total, 61,14% compreendem a fração orgânica, passível de ser biologicamente decomposta em biogás.

Para a coleta destes resíduos é utilizada uma frota de 6 caminhões compactadores de RSU com capacidade para 6 toneladas propelidos a diesel, percorrendo diariamente viagens estimadas em 70 km.

A composição gravimétrica dos RSU produzidos em Guaratinguetá – SP é mostrada na **Figura 8** - Composição dos RSU em Guaratinguetá. Destacam-se a FORSU, os rejeitos e a fração reciclável dos RSU.

Figura 8 - Composição dos RSU em Guaratinguetá.



Fonte: Elaboração própria, com dados de Prefeitura Municipal Da Estância Turística De Guaratinguetá/SP (2019).

Na **Figura 8** é mostrada a composição dos RSU de Guaratinguetá, sendo 61,14% materiais orgânicos, 24,51% materiais recicláveis (plástico, vidro, papel e metal) e 14,35% de rejeitos.

2.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA DE FORSU

A digestão anaeróbia (DA) é um processo em que microrganismos decompõem resíduos orgânicos na ausência de oxigênio, resultando na produção de biogás, um gás rico em metano, e matéria digerida. Segundo Mcinerney e Bryant (1981) esse processo envolve quatro estágios consecutivos: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

No estágio de hidrólise, ocorre a quebra de componentes orgânicos complexos, como carboidratos (amido), proteínas e gorduras, em substâncias solúveis, como glicose (açúcar), aminoácidos e ácidos graxos.

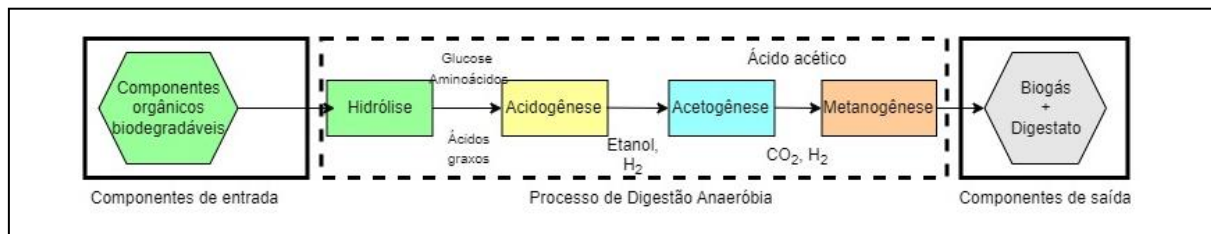
A acidogênese, também conhecida como estágio fermentativo, desintegra ainda mais os produtos da hidrólise, resultando na produção de etanol, ácidos graxos, dióxido de carbono (CO_2) e gás hidrogênio (H_2).

O terceiro estágio, acetogênese, é onde os ácidos orgânicos gerados durante a acidogênese são convertidos em ácido acético, dióxido de carbono (CO_2) e gás hidrogênio (H_2).

Por fim, na metanogênese, ocorre a produção de biogás (uma mistura de metano (CH_4) e CO_2) juntamente com outros gases, como H_2S e vapor d'água. Na **Tabela 4** é indicada a composição química típica do biogás de aterro sanitário, em comparação com o gás natural e biogás oriundo de digestor anaeróbio.

Na **Figura 9** são indicadas as quatro etapas da biodigestão anaeróbia, desde os componentes orgânicos até a metanogênese e formação do digestato.

Figura 9 - Etapas da biodigestão anaeróbia.



Fonte: Adaptado de Alao, Popoola e Ayodele (2022).

Em comparação com o gás natural, o biogás costuma ter uma concentração volumétrica menor de metano, bem como uma proporção maior de gás carbônico e outras moléculas como Amônia, H_2S e Siloxanos. As composições típicas desses gases são mostradas na **Tabela 4**.

Tabela 4 - Composições típicas de Biogás e Gás Natural.

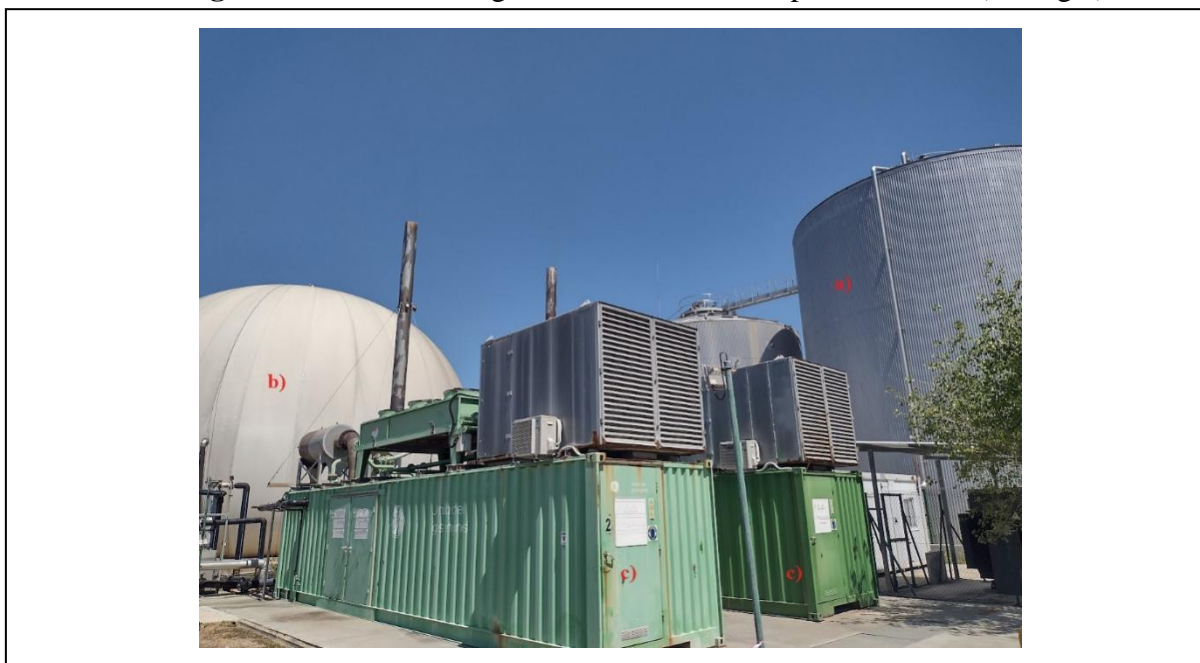
Gás na composição	Unidade	Biogás de RSU	Gás Natural
CH ₄	%Vol	53-70	81,89
CO ₂	%Vol	30-50	0,67-1
N ₂	%Vol	02-06	0,28-14
O ₂	%Vol	0-5	0
Outros HC	%Vol	0	3,5-9,4
H ₂	%Vol	0	NA
H ₂ S	%Vol	0,50	0-2,9 (ppm)
NH ₃	%Vol	0,050	0
Cloro	Mg/Nm ³	(0,25	NA
Siloxanos	µg/g·DW	0,08 - 0,5	NA

Fonte: Com dados de Yang (2014) e Vitázek et al. (2016).

O biogás de digestão anaeróbia é produzido em reatores apropriados em condições de maior controle das condições físico-químicas, de forma em que é possível uma maior previsibilidade das características de sua composição. Já o biogás oriundo de aterros sanitários, também chamado de Gás de Lixo (GDL) é produzido em condições menos controladas de temperatura e umidade, sendo que a concentração de seus componentes é afetada por condições climáticas bem como a composição dos resíduos depositados.

Para fins ilustrativos, na **Figura 10** é mostrada uma planta de digestão anaeróbia de FORSU da empresa Valorlis - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A, localizada em Leiria (Portugal).

Figura 10 - Planta de digestão anaeróbia da empresa Valorlis (Portugal).



Fonte: Arquivo pessoal.

Nota-se na **Figura 10** alguns dos principais elementos de uma planta de digestão anaeróbia de FORSU: a) Reator anaeróbio principal, na forma de um tanque metálico, b) Gasômetro, para armazenamento do biogás, c) Grupos geradores a biogás.

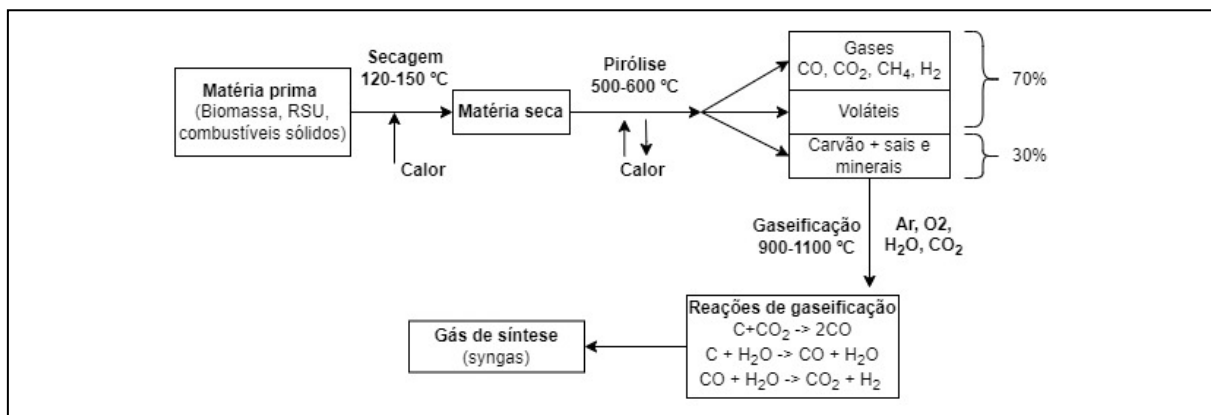
2.5 GASEIFICAÇÃO DE RSU

Entre os processos de conversão energética dos RSU destacam-se também a gaseificação. A gaseificação é um processo termoquímico de alta temperatura (600 °C – 1000 °C) que envolve diversas reações químicas sendo essa definida pela conversão de um combustível composto orgânico sólido em um combustível gasoso, por meio de sua oxidação parcial em altas temperaturas (OKOLIE et al., 2022). Este combustível, conhecido como gás de síntese, ou *syngas*, é um vetor energético, podendo convertido em seguida a fim de produzir calor, potência mecânica e elétrica.

O processo de gaseificação dos RSU vem sendo analisada em diversos estudos com o objetivo de se encontrar uma solução adequada para a deposição do lixo urbano. Segundo Kumar e Samadder (2017) a maior parte do RSU é composto de material orgânico (biomassa), que deve ser separado de materiais como vidros, metais e plásticos diversos, destinados à reciclagem, e serem aproveitados energeticamente.

A gaseificação compreende diversas fases, incluindo a secagem, pirólise, oxidação/craqueamento dos componentes voláteis e a gaseificação do carvão. A fase de gaseificação é de especial relevância, visto que regula a geração de gás de síntese, a conversão total do carbono e, por conseguinte, a eficácia global do procedimento. (NGUYEN et al., 2018). Como resultado, tem-se um gás combustível rico em moléculas de H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , N_2 e H_2O (RUDRA; TESFAGABER, 2019). Neste caso, o interesse energético repousa sobre o H_2 e CO , sendo o primeiro um vetor não poluente de elevado Poder Calorífico Inferior (PCI). O processo de gaseificação, com suas respectivas fases é ilustrado na **Figura 11**:

Figura 11 - Fases do processo de gaseificação.

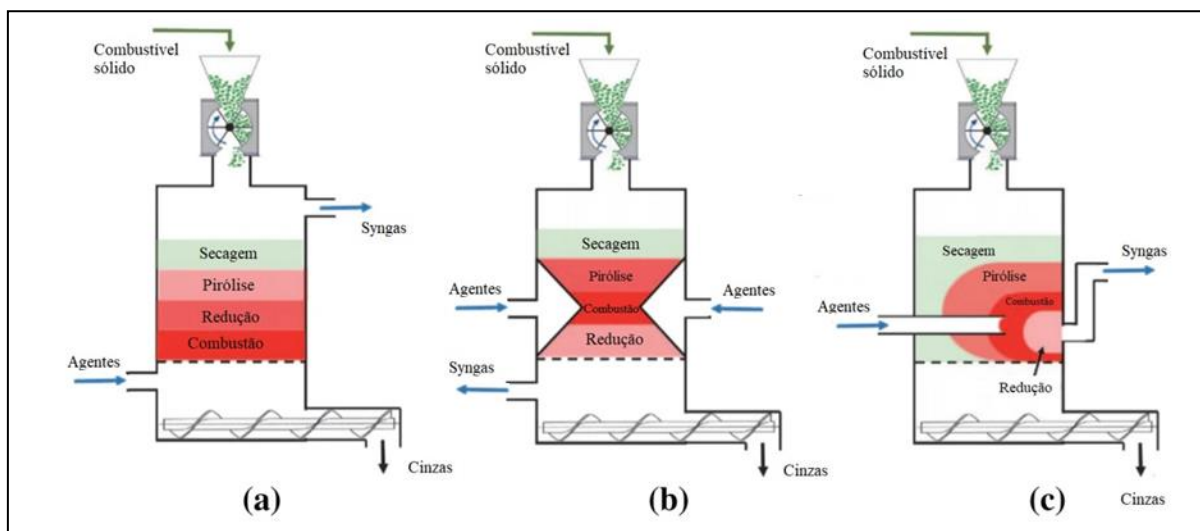


Fonte: Traduzido de Vargas e Fajardo (2010).

Conforme a interação entre gás e sólido, podem ser categorizados em: (1) Leito fixo; (2) Leito fluidizado; e (3) Leito de fluxo arrastado, com subdivisões baseadas na direção do fluxo de gaseificação através do leito. Isso resulta em classificações para os gaseificadores de leito fixo, incluindo *downdraft* (descendente), *updraft* (ascendente) e *crossdraft* (cruzado); e para os de leito fluidizado, como *bubbling* (borbulhante) e *circulating* (circulante).

Os gaseificadores de leito fixo geralmente são aplicados em plantas de pequeno porte, admitindo uma grande variedade de matéria-prima. Sua temperatura na zona de reação é de cerca de 1090 °C; e o gás de saída apresenta uma temperatura entre 450 e 650 °C (RAFEY et al., 2023). Esquemáticamente, os principais tipos de gaseificadores de leito fixo são mostrados na Figura 9, destacando suas divisões por zona de reações e direção dos fluxos de alimentação:

Figura 12 - Tipos de gaseificadores de leito fixo e respectivas zonas de reações.



Fonte: Traduzido de Siddiqui et al. (2022)

Na Figura 12(a) são mostrados os principais tipos de gaseificadores de leito fixo utilizados atualmente. Identifica-se a entrada de combustível sólido (como por exemplo, biomassa) na parte superior e, em cada caso, a entrada do agente gaseificador (geralmente ar, oxigênio, ou vapor) e as saídas de *syngas* e cinzas.

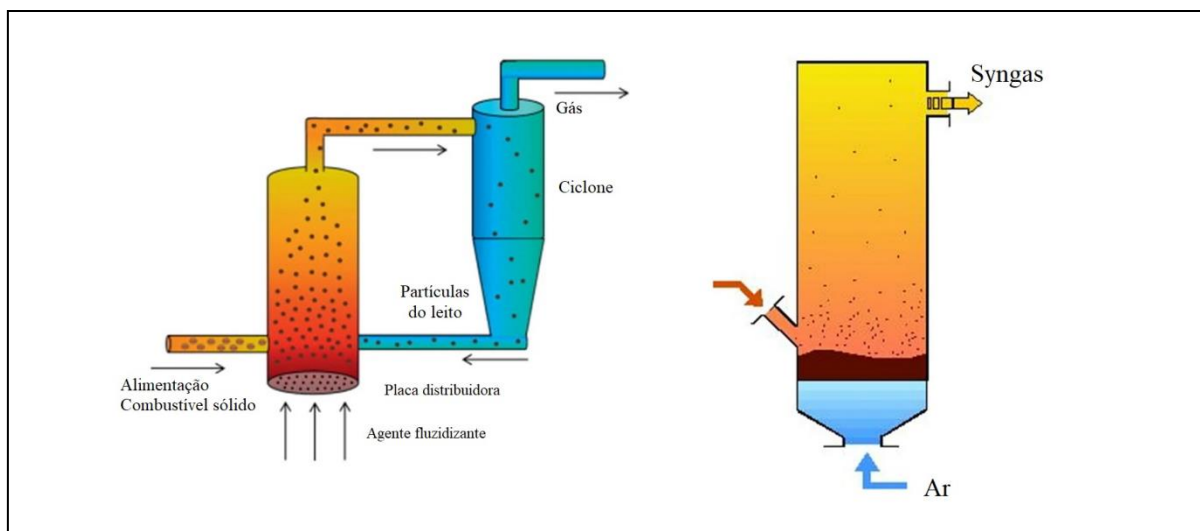
Mostra-se na **Figura 12(a)** mostra-se um gaseificador do tipo *updraft*, em que o fluxo dos gases se dá em contracorrente com o sentido da alimentação do combustível. Este tipo possui uma maior simplicidade construtiva e alta eficiência, porém os elevados teores de alcatrão ($20 - 100 \text{ g/Nm}^3$) e material particulado ($0,1 - 1 \text{ g/Nm}^3$) tornam o gás resultante mais indicado para queima direta, em oposição à aplicação em MCI, em que necessitaria de um sistema para remoção do alcatrão.

A Figura 9 (b) mostra um gaseificador do tipo *downdraft*, ou co-corrente, em que a alimentação se dá no mesmo sentido dos gases. Neste caso, alcançam-se as menores concentrações de alcatrão, sendo produzido um syngas próprio para consumo em motores. No entanto, a biomassa ser fornecida com homogeneidade e umidade inferior a 25%, não sendo admitidos materiais de baixa densidade.

Em (c) se vê um gaseificador do tipo *cross-draft*, em que os agentes são alimentados de forma cruzada em relação ao combustível. Com este tipo de gaseificador, alcançam-se as menores concentrações de alcatrão, sendo produzido um syngas próprio para consumo em motores. No entanto, a biomassa ser fornecida com homogeneidade e umidade inferior a 25%, não sendo admitidos materiais de baixa densidade.

Os gaseificadores de leito fluidizado são geralmente empregados em plantas de médio porte, tendo sua zona de reação e gases de saída atingindo temperaturas entre 800 °C e 1000 °C. Entre os tipos de gaseificadores de leito fluidizado, destacam-se os do tipo leito borbulhante e leito circulante. Na **Figura 13** são mostrados os esquemas com os fluxos de alimentação e exaustão destes dois tipos de gaseificadores:

Figura 13 - Gaseificadores de leito fluidizado.



Fonte: Traduzido de Siddiqui et al. (2022).

No gaseificador de leito fluidizado não são observadas zonas diferenciadas de reação, como ocorre no leito fixo. Esses gaseificadores apresentam um leito isotérmico (700 a 900 °C) em que as partículas de combustível sólido são mantidas em suspensão em um leito de partículas inertes (areias, ou cinzas) por meio de um fluxo ascendente de ar.

Assim, há um maior contato entre as partículas de combustível sólido e o gás interno circulante. Nessas condições as reações ocorrem individualizadamente em cada partícula, em condições que otimizam a eficiência das reações.

Como vantagem dos gaseificadores de leito fluidizado, tem-se a maior uniformidade de temperaturas no reator e a não necessidade de briquetagem do combustível.

Na **Figura 13** mostra-se à esquerda um gaseificador de leito fluidizado do tipo leito circulante e, à direita, com leito borbulhante. As principais características destes tipos são mostradas na **Tabela 5**, podendo-se compará-las em termos de temperatura de operação, teor

de alcatrões e material particulado, bem como potência elétrica de geração, se utilizados MCIs e geradores para o aproveitamento do *syngas*:

Tabela 5 - Comparativo técnico entre os principais tipos de gaseificadores.

Tipo de leito	Tipo	Temperatura (°C)		Teor de alcatrões	Teor de Material Particulado	MW _e	
		Reação	Saída			Mínimo	Máximo
Fixo	Downdraft	1000	800	Muito baixo	Moderado	0,1	1,0
	Updraft	1000	250	Muito alto	Moderado	1,0	10
Fluidizado	Borbulhante	850	850	Médio	Alto	1,0	50
	Circulante	1000	850	Baixo	Muito alto	5,0	100

Fonte: (CORONADO; YOSHIOKA; SILVEIRA, 2011)

A utilização de *syngas* em Motores de Combustão Interna (MCI) foi estudada por de Campos et al. (2019), sendo considerado um combustível apropriado para a geração de eletricidade. O *syngas* de RSU pode ser utilizado em turbinas a gás com o mesmo propósito de geração de energia elétrica (CHACARTEGUI et al., 2012).

Além de sua utilização direta em ciclos termodinâmicos, o *syngas* pode ser tratado a fim de se obter hidrogênio próprio para consumo em células-a-combustível, uma tecnologia emergente em aplicações de transporte (OZTURK; DINCER, 2021). Neste caso, a técnica mais utilizada tem sido a reforma a vapor do *syngas* seguido de reação de deslocamento (*gas shift*), com obtenção de uma mistura de H₂ e CO₂, que podem ser separados para a obtenção de hidrogênio com maior grau de pureza.

Na **Figura 14** é mostrado um gaseificador do tipo leito fluidizado, com capacidade de 100 kg/h, localizado nas instalações da BioBIP, do Instituto Politécnico de Portalegre (Portugal).

Figura 14 - Gaseificador do tipo leito fluidizado.



Fonte: Arquivo pessoal.

Na Figura 14 é possível localizar: 1- esteira de alimentação de biomassa, 2- reator do tipo leito fluidizado, 3a e 3b – Trocadores de calor, 4a e 4b – filtros ciclone, para remoção de cinzas, 5 – condensador, 6 – Filtro de manga.

2.6 SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA (SHGE)

Outra possibilidade para o aproveitamento do potencial energético dos RSU para geração de energia elétrica é por meio de sistemas híbridos de geração, em que as fontes de energia se complementam, reduzindo o impacto de suas variações individuais.

Roberts et al. (2018) estudaram a otimização de sistemas híbridos com energia solar fotovoltaica, eólica e motores geradores a diesel, considerando armazenamento em baterias. Llerena-Pizarro et al. (2019) analisaram a integração de sistemas híbridos com energias solar, eólica e da biomassa visando o suprimento elétrico em comunidades insulares no arquipélago de Galápagos. Moura, Silveira e Lamas (2020) analisaram tais sistemas híbridos com o objetivo de produção de hidrogênio eletrolítico. Uma conclusão comum a tais estudos é que a geração em sistemas híbridos possibilita um aproveitamento otimizado das características dos recursos disponíveis no local.

Considerando a disponibilidade local da energia do biogás da fração orgânica dos MSW e a demanda elétrica do processamento de tais resíduos, tem-se uma oportunidade para a análise do aproveitamento híbrido da energia solar fotovoltaica em conjunto com o potencial energético disponível nos RSU locais, com o conceito de planta Waste-to-Energy (WtE), conforme

estudado por Ferraz De Campos et al. (2021). A geração híbrida com plantas WtE e fotovoltaica já foi analisada em alguns estudos (ASANTE; GYAMFI; AMO-BOATENG, 2023) (SAJID KHAN et al., 2023) (ISLAM; AL RAFI; HOSSAIN, 2019).

Há, contudo, uma carência na literatura de estudos que relacionem esse tipo específico de usinas híbridas com a produção de hidrogênio verde. Propõe-se, portanto, uma análise teórica, baseada em um estudo de caso, visando a produção de uma certa quantidade diária de hidrogênio, voltado ao atendimento de uma demanda teórica causada pela adoção hipotética de uma frota municipal de caminhões com célula a combustível movidos a hidrogênio.

2.7 HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO

Nos últimos anos, a busca por soluções energéticas sustentáveis tem ganhado destaque devido aos desafios relacionados às mudanças climáticas e à necessidade premente de diminuição das emissões de gases de efeito estufa. Nesse cenário, o hidrogênio emerge como um vetor energético versátil e de alta capacidade (120 MJ/kg) se comparado a outros combustíveis.

Enquanto outras fontes renováveis de energia, como eólica e solar, são altamente dependentes das condições climáticas, o hidrogênio pode ser produzido com o uso dessas fontes e armazenado para uso posterior (MAYYAS; WEI; LEVIS, 2020). O hidrogênio pode também ser utilizado como combustível para aplicações de transporte, substituindo combustíveis fósseis em carros, ônibus, caminhões, trens, navios e aeronaves (GRAY et al., 2021).

Atualmente, a reforma a vapor do metano derivado do gás natural é o método mais utilizado para a produção do hidrogênio (GOMEZ; BACA; GARZON, 2020). Por outro lado, a eletrólise tem ganhado destaque pelo fato de não emitir de forma direta gases de efeito estufa e utilizar água como matéria prima. O custo relativamente mais alto ainda é um desafio para o aumento da penetração desta tecnologia (MAYYAS; MANN, 2019).

A eletrólise é um processo eletroquímico em que ocorre a dissociação da água, tendo como produtos o hidrogênio e oxigênio moleculares. Neste processo, a aplicação de um potencial elétrico maior que um valor mínimo promove a condução de corrente elétrica entre os eletrodos, provocando reações que, em um meio condutor básico, resultam na seguinte equação global (ROJAS et al., 2023):











Os eletrolisadores geralmente são classificados de acordo com o tipo de eletrólito utilizado, condições de operação e agentes iônicos (OH^- , H^+ , O^{2-}) (SHIVA KUMAR; HIMABINDU, 2019), porém mantendo-se o princípio de operação e equação de reação global. Os principais tipos de eletrolisadores são os alcalinos, Proton Exchange Membrane (PEM) e Solid Oxide Electrolyzer (SOE).

2.7.1 Hidrogênio verde

Ao longo da última década, tornou-se comum na tanto na literatura científica quanto na mídia e política, uma classificação de processos de produção de hidrogênio baseada em uma paleta de cores. De acordo com essa classificação, as formas de produção são divididas por cores de acordo com as tecnologias e matérias primas envolvidas, bem como o nível de emissões de gases de efeito estufa. Uma classificação resumida é mostrada na **Tabela 6**, com informações de Incer-Valverde et al. (2023).

Tabela 6 - Paleta de cores da produção de hidrogênio.

Cor	Fonte	Processo	Emissões de carbono	
	Verde	Eletricidade renovável	Eletrólise	Sem emissões diretas. Varia com a fonte.
	Laranja	Rede elétrica	Eletrólise	Depende da composição da rede elétrica.
	Pink	Nuclear	Eletrólise	Sem emissões diretas.
	Cinza	Combustível Fóssil	Gaseificação/Reforma a vapor/Sem CCUS	Emissões diretas na atmosfera.
	Azul	Combustível Fóssil	Gaseificação/Reforma a vapor	Emissões mitigadas com CCUS.
	Turquesa	Gás Natural	Pirólise do metano	Carbono retido em estado sólido.
	Marrom	Carvão	Gaseificação de carvão (lignito)	Emissões diretas na atmosfera.
	Preto	Carvão	Gaseificação de carvão (antracito)	Emissões diretas na atmosfera.

Fonte: Elaboração própria, com informações de Incer-Valverde et al. (2023).

Não há até o momento uma definição formal que especifique cada cor. No entanto, a literatura comumente refere o hidrogênio verde como o hidrogênio produzido por meio da eletrólise da água com eletricidade gerada por meio de fonte renovável (ARCOS; SANTOS, 2023a), (WORLD ENERGY COUNCIL, 2021). Também são comumente mencionados os hidrogênios turquesa, derivado da pirólise do metano, o hidrogênio azul, derivado da reforma

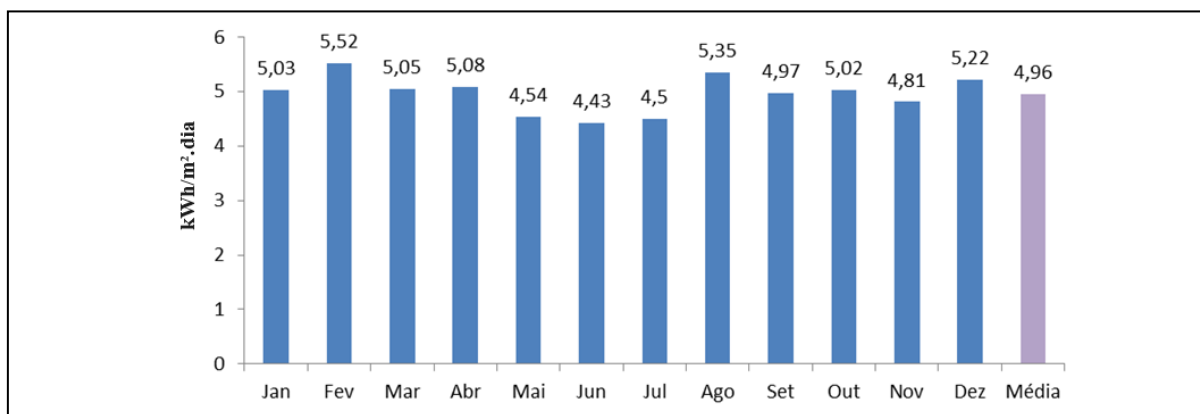
a vapor ou gaseificação de combustíveis fósseis com captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), além do hidrogênio cinza, quando não há CCUS (RIEMER; DUSCHA, 2023). A respeito das outras classificações há um consenso menor, havendo variações de acordo com a fonte.

Diferentes fontes de energia têm sido estudadas para a produção de hidrogênio verde, como a solar (ATTEYA; ALI; HOSSAIN, 2022) (YADAV; BANERJEE, 2020) (BURTON et al., 2021), eólica (AYODELE; MUNDA, 2019) (GROENEMANS et al., 2022) (SINGLITICO; ØSTERGAARD; CHATZIVASILEIADIS, 2021), biomassa, ou então sistemas híbridos, compostos por mais de uma fonte, como solar e eólica (NASSER et al., 2022) (NAMI et al., 2022), ou mesmo solar, eólica e biomassa (MOURA; SILVEIRA; LAMAS, 2020b) (NAMI et al., 2022). Tais combinações procuram extrair vantagens operacionais de cada fonte, aproveitando eventuais compensações em meio à variabilidade característica de fontes como solar e eólica. A utilização da rede de fornecimento elétrico para o processo de eletrólise pode ocasionar em diferentes combinações de fontes, renováveis ou não, dando origem ao hidrogênio classificado como amarelo (ARCOS; SANTOS, 2023b).

2.8 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O município de Guaratinguetá – SP fica localizado na região paulista do Vale do Paraíba. De acordo com dados fornecidos pelo CRESESB, a irradiação solar média anual é de 4,96 kWh/m².dia (CRESESB, 2023). As médias mensais de irradiação solar são mostradas na **Figura 15**.

Figura 15 - Irradiação solar mensal média em Guaratinguetá – SP.

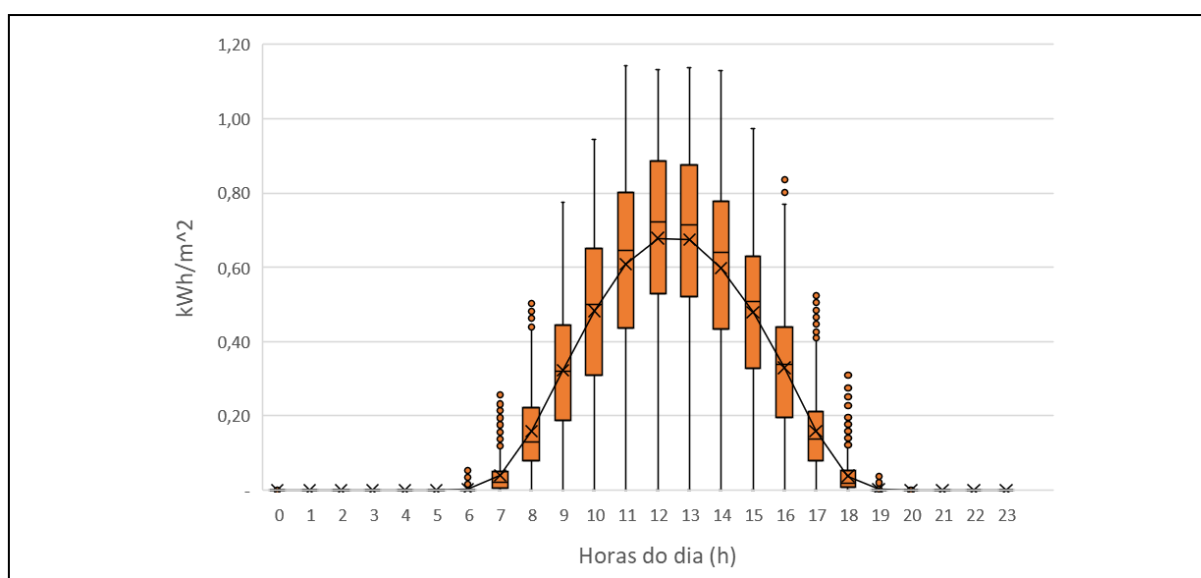


Fonte: Elaboração própria, com dados do CRESESB (2023).

Na **Figura 15** mostra-se a irradiação solar média para cada mês do ano, destacando-se a média anual de $4,96 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{dia}$. Com este valor é feito o dimensionamento da planta solar fotovoltaica, como será detalhado adiante.

Dados de irradiação solar em base horária fornecem uma informação mais detalhada da distribuição temporal da irradiação solar. Para tal, foi realizado um levantamento da irradiação solar em base horária em Guaratinguetá foi realizado, com dados disponibilizados no Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2022). Neste sistema, irradiações solares em base horária, no intervalo entre 01/01/2020 e 13/07/2023, foram coletadas e tratadas para maior consistência, eliminando dados inválidos ou negativos. Esses dados foram organizados e são mostrados na **Figura 16**.

Figura 16 - Distribuição diária da irradiação solar em Guaratinguetá - SP.



Fonte: Elaboração própria, com dados do INPE (2022).

Verifica-se um padrão de variação da irradiação solar no período de um dia. Na **Figura 16** são mostrados na forma de gráficos de barras as irradiações em base horária. Essa irradiação está concentrada entre as 6 e 19 horas, alcançando o pico por volta das 12 horas. Neste momento, o segundo e o terceiro quartil correspondem a $0,53$ e $0,89 \text{ kW/m}^2$, com uma mediana de $0,72 \text{ kW/m}^2$. A máxima irradiação verificada neste período foi de $1,13 \text{ kW/m}^2$. A soma das irradiações médias horárias resulta em uma irradiação média diária de $4,91 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{dia}$, valor semelhante à média anual encontrado em (CRESESB, 2023).

2.8.1.1 Energia solar fotovoltaica em sistemas híbridos de geração

A energia solar fotovoltaica, dependente das condições naturais de disponibilidade de irradiação solar, variável ao longo do dia e sujeita a condições climáticas, é classificada como uma fonte não despachável. Segundo Baroni (2022) Uma fonte de geração não despachável diz respeito à geração de eletricidade por meio de tecnologias que não se adaptam completamente para suprir a demanda de energia, já que sua produção depende das condições climáticas. Neste tipo de fonte, é possível realizar ajustes para baixo de geração ou aumentar para níveis pré-redução caso haja disponibilidade do recurso. Contudo, se a fonte de energia primária (irradiação solar ou vento) não estiver disponível, não é possível realizar a geração de eletricidade.

Especificamente no caso da energia solar, é possível que sua saída energética seja superior ao demandado em determinados momentos do dia. Assim, este recurso pode ser melhor aproveitado se considerar sistemas de armazenamento, como baterias, ou contar com a integração com a rede elétrica, fornecendo ou vendendo excedentes de geração em horários de pico e possibilitando a recompra desses excedentes em outros períodos.

Outra possibilidade para este aproveitamento é por meio de sistemas híbridos de geração, em que as fontes de energia se complementam, reduzindo o impacto de suas variações individuais, conforme estudado por Roberts et al. (2018) e Llerena-Pizarro et al. (2019).

Uma conclusão comum a tais estudos é que a geração em sistemas híbridos possibilita um aproveitamento otimizado das características dos recursos disponíveis no local.

Neste sentido, considerando a disponibilidade da energia do biogás da fração orgânica dos RSU e a demanda elétrica do processamento de tais resíduos, decorre uma oportunidade para a análise de um sistema híbrido solar-biogás.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, são apresentados os métodos de cálculo adotados para as análises técnica, ambiental e econômica, incluindo as equações e premissas empregadas em cada caso. Além disso, são descritos os materiais e métodos utilizados na parte experimental deste estudo, em que foram realizadas as análises aproximada e última de uma amostra de resíduo alimentar. Essas análises possibilitaram a determinação do potencial de produção e da composição do biogás gerado a partir dessa fração de resíduo, que constitui a maior parte dos RSU.

A análise técnica compreende a análise dos processos envolvidos no aproveitamento energético dos RSU por meio de digestão anaeróbia e gaseificação, com obtenção de biogás e/ou *syngas* e posterior utilização destes combustíveis em MCI para geração de energia elétrica. O objetivo desta geração termoeletrica é complementar a geração de uma planta fotovoltaica, de modo a atender uma demanda elétrica decorrente da produção de hidrogênio com eletrólise.

Assim, são determinados os fluxos de resíduos na entrada dos processos de gaseificação e digestão anaeróbia, fluxos de *syngas* e biogás produzidos, bem como as gerações elétricas decorrentes do uso destes combustíveis e do potencial solar. Tais gerações são analisadas separadamente e combinadas na forma de um sistema híbrido de geração.

Uma vez que os sistemas e tecnologias são analisadas na forma de uma proposta de aplicação tecnológica, o presente trabalho contempla também o estudo dos potenciais de geração elétrica presentes na forma de biogás já produzidos atualmente no aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP, onde são depositados os RSU do município de Guaratinguetá. Assim são calculados os potenciais anuais de produção de biogás e geração de eletricidade com este gás.

A análise ambiental foi realizada com base na metodologia da análise de eficiência ecológica. Neste caso, calculam-se os fatores de emissão da geração elétrica decorrente da combustão do *syngas* e do biogás em MCI, seguidos dos cálculos das respectivas eficiências ecológicas. Esta análise foi realizada considerando tanto os sistemas separadamente, como na forma de planta híbrida com energia solar fotovoltaica.

A análise econômica visou a determinação dos custos de produção de energia elétrica e hidrogênio. Inicialmente foram calculados os custos de geração de energia elétrica nos cenários

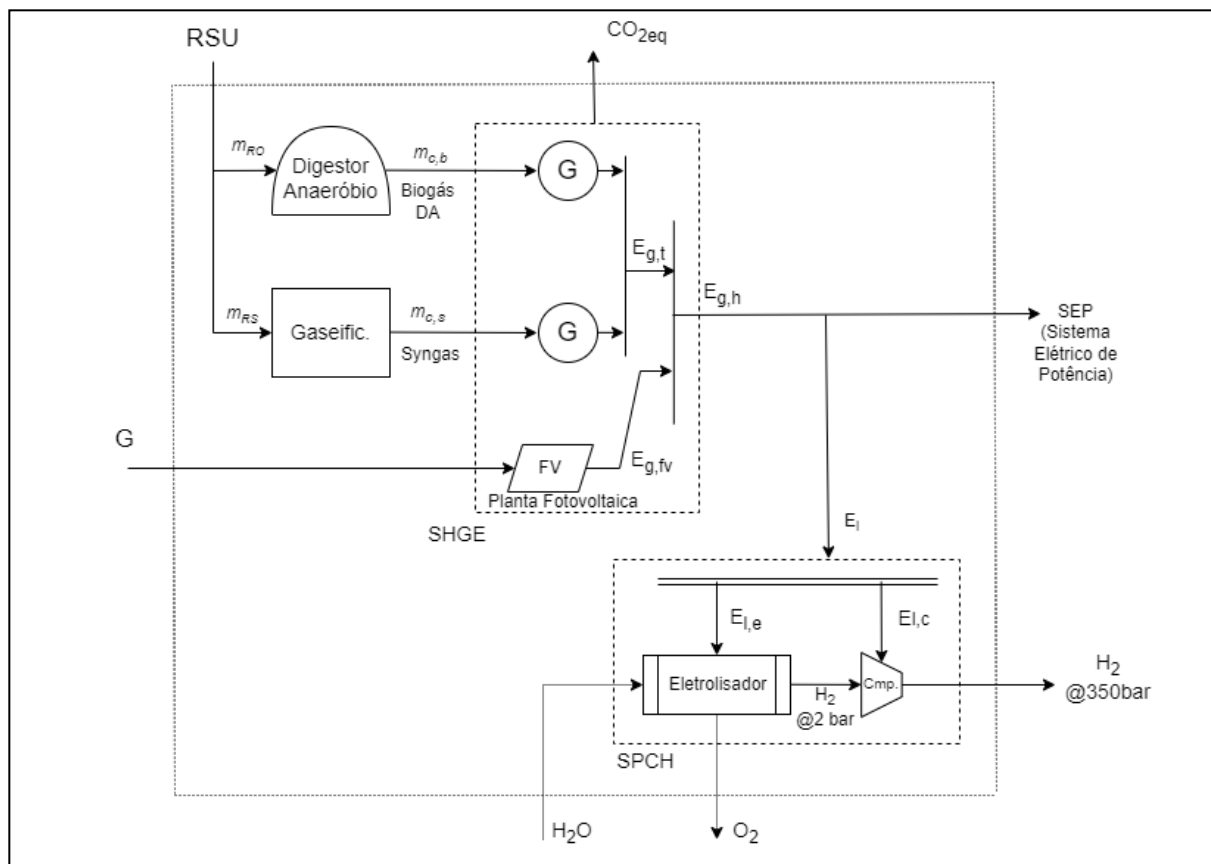
considerados e, com isto e mais os custos de capital e operação relativos à produção de hidrogênio, foram calculados os custos de produção do hidrogênio.

3.1 ANÁLISE TÉCNICA

A análise técnica se concentra no estudo de fluxos de massa e energia em uma matriz energética baseada em um Sistema Híbrido de Geração de Energia (SHGE) com a finalidade de suprir eletricamente um Sistema de Produção e Compressão de Hidrogênio (SPCH).

O SHGE proposto é composto por uma planta solar fotovoltaica e uma planta termoelétrica abastecida com biogás e *syngas* produzidos a partir de processamento de RSU da cidade de Guaratinguetá – SP. O diagrama mostrado na **Figura 17** ilustra os principais componentes, fluxos e processos.

Figura 17 - Diagrama da matriz energética de RSU analisada.



Fonte: Elaboração própria.

Nota-se a fronteira do sistema mostrado na Figura 17, com as entradas de RSU e irradiação solar (G), bem como as saídas em vazão de hidrogênio e energia elétrica excedente exportada ao sistema elétrico de potência. No interior desta fronteira, os subsistemas da planta

híbrida solar-termoelétrica e do sistema de produção de hidrogênio, que compõe a carga elétrica a ser alimentada pela geração.

A planta fotovoltaica é composta por painéis fotovoltaicos de 395 W, conforme folha de dados da fabricante Canadian Solar (2021) com eficiência de 20,5% e área específica de 0,205 kW/m² instalados em estruturas de solo, nas proximidades da planta termoelétrica. Considera-se a utilização de um inversor CC/CA com eficiência de 90%.

A geração diária da planta fotovoltaica (kWh) deverá ser igual à demanda diária do eletrolisador e do compressor, cujas demandas elétricas agregadas são denominadas neste estudo como cargas. Ou seja, a quantidade de eletricidade gerada no período de um dia deverá ser igual ao montante demandado pela carga durante igual período.

Considerando a variabilidade inerente à geração com sistemas fotovoltaicos, a planta termoelétrica terá como função suprir a demanda da carga nos momentos em que a potência gerada pela planta fotovoltaica for insuficiente. Dessa forma, sua potência de geração (kW) será no mínimo igual à potência da carga, assegurando o seu suprimento. A planta termoelétrica será composta por dois MCI alimentados separadamente por *syngas* e biogás. Eventualmente, excedentes de geração serão produzidos, quando a geração total for maior que a demanda diária.

São calculados também os potenciais de produção de biogás no aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP, bem como seu potencial de geração de energia elétrica. Esta análise tem como objetivo um diagnóstico de potenciais considerando o paradigma atual de gestão de RSU na região do Vale do Paraíba, em que praticamente todo o resíduo é lançado ao aterro. Como há um histórico anterior de deposições no aterro, um potencial está disponível e pode ser aproveitado, independentemente de outras soluções que venham a ser propostas ou adotadas.

3.1.1 MATRIZ ENERGÉTICA DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU

O aproveitamento do conteúdo energético presente nos RSU representa uma oportunidade ainda pouco explorada no Brasil para a geração de energia elétrica, não tendo ainda sido relatada no país a utilização deste recurso para a produção de hidrogênio.

Aterros sanitários, bem como áreas de triagem de RSU intensivas no uso de solo, de forma que áreas desativadas de aterros, com possibilidades de utilização bastante restritas, podem ser utilizadas para a implantação de plantas fotovoltaicas. Foi estuada por Szabó et al.

(2017) a viabilidade técnica e econômica deste tipo de instalação, sendo mencionado que esta possibilidade pode, além de valorizar um terreno sem uso, favorecer economicamente a operação de um aterro fechado que, sem obter receitas, ainda possui custos com manutenção.

Lopes et al. (2019) analisaram essa possibilidade para aplicação no Brasil, sendo destacados cenários com inserção da energia solar em aterro sanitário no enquadramento de micro ou minigeração distribuída.

Assim, tem-se a possibilidade de se analisar o uso energético do biogás decorrente da digestão anaeróbia FORSU (em aterros sanitários ou digestores anaeróbios controlados) e de RSU inteiro (gaseificação), além da utilização da área dos aterros para geração com energia fotovoltaica. Tendo um conjunto de recursos energéticos relacionados, pode-se analisar estas fontes em conjunto, na forma de um tipo de matriz energética própria do tratamento dos RSU.

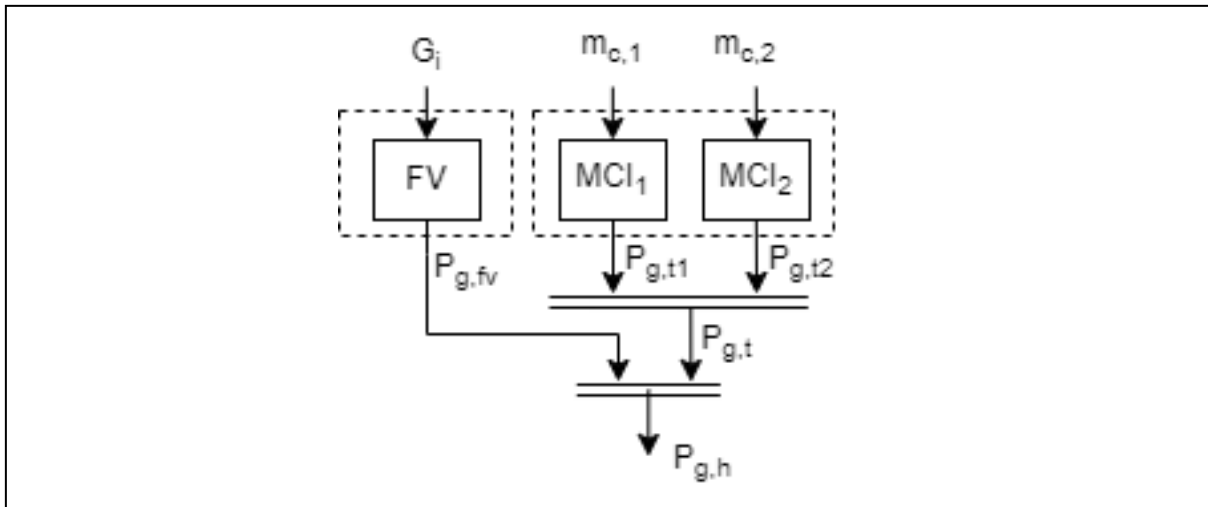
Tendo traçado cenários para geração de energia elétrica, a produção de hidrogênio é possibilitada por meio da eletrólise, processo este, cujo impacto ambiental pode ser relacionado fortemente com a fonte da energia elétrica empregada. Considerando as tecnologias analisadas neste estudo, analisa-se cenários em que diferentes fontes são empregadas para este fim. Ou seja, utilizar a energia elétrica gerada a partir de diferentes formas de processamento dos RSU no processo de eletrólise. Depreende-se disso, um tipo de matriz energética particular para a produção de hidrogênio a partir da eletricidade gerada com RSU.

3.1.2 Principais cenários analisados

Diferentes configurações, tanto da planta termoelétrica como da planta solar fotovoltaica, são consideradas, de modo a serem formulados cenários para as análises técnica, econômica e ambiental.

A planta solar fotovoltaica terá sua potência instalada analisada em diferentes dimensionamentos, de 0 a 100% de sua potência original. Com isto, é possível analisar o efeito sobre a necessidade de geração complementar por parte da planta termoelétrica.

A planta termoelétrica terá sua potência total ($P_{g,t}$) mantida em todos os cenários, variando-se a configuração de seu funcionamento, à base de *syngas*, de biogás, ou ambos os combustíveis. As configurações consideradas nos diferentes cenários são mostradas na **Figura 18**.

Figura 18 - Cenários analisados para a planta termelétrica.

Fonte: Elaboração própria.

À esquerda, observa-se a planta fotovoltaica, alimentada com a irradiação solar. À direita, a planta termoelétrica, composta por dois grupos geradores MCI, alimentados com *syngas* e/ou biogás. Tem-se, portanto a possibilidade de analisar diferentes configurações de SHGE a fim de alimentar a carga para produção de hidrogênio. Os cenários a serem analisados são mostrados na **Tabela 7**.

Tabela 7 - Cenários de geração termoelétrica utilizando biogás e *syngas*.

$P_{g,fv}$	$m_{c,1}$	$m_{c,2}$	Abreviação
100% de P_{FV}	<i>Syngas</i>	<i>Syngas</i>	FV + S
100% de P_{FV}	Biogás	Biogás	FV + B
100% de P_{FV}	Biogás	<i>Syngas</i>	FV + S'B'

Eventualmente, cada cenário FV+S, FV+B e FV+S'B' poderá ser expandido com a variação de P_{FV} , de modo a se observar o efeito principalmente sobre os custos da energia gerada e a eficiência ecológica da planta como um todo.

3.1.3 Digestão anaeróbia da FORSU

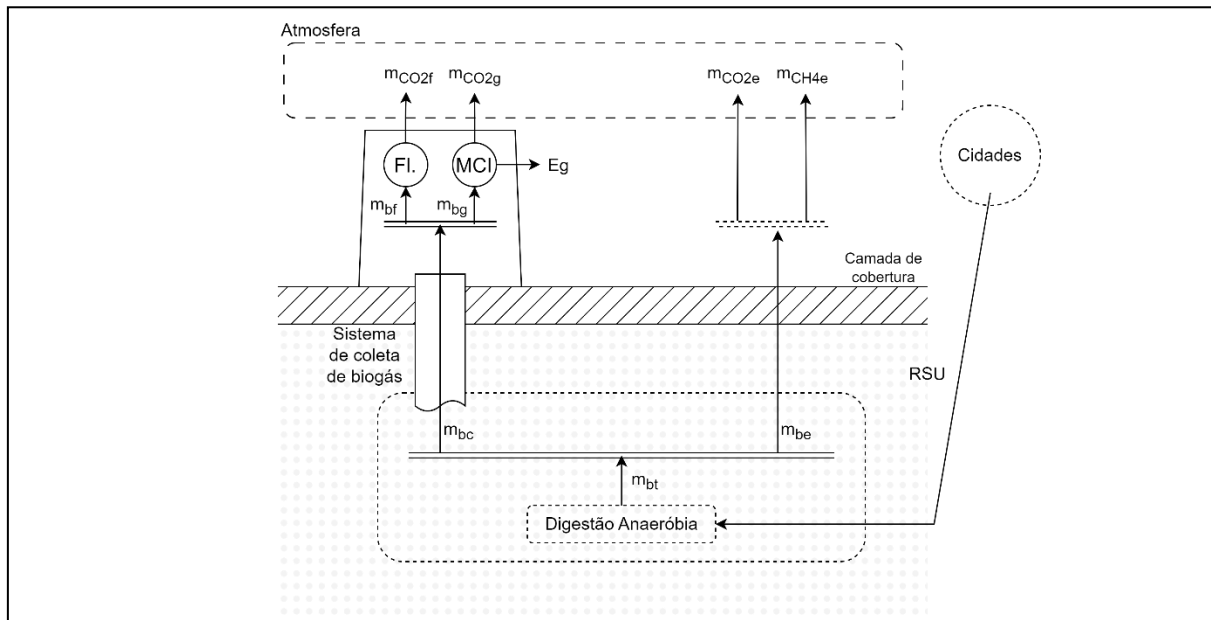
Considera-se que a FORSU pode ser degradada biologicamente e, na ausência de oxigênio, ocorrer a sua digestão anaeróbia. Primeiro, analisa-se as condições e potenciais para este processo por meio da deposição dos RSU em aterro sanitário. Em seguida analisa-se este processo no contexto da utilização de reatores anaeróbios apropriados, desviando-se tais resíduos do aterro sanitário para um tratamento de separação completa da FORSU das demais frações residuais.

3.1.3.1 Digestão anaeróbia em aterros sanitários

3.1.3.1.1 Modelo de aterro sanitário adotado

O modelo adotado ainda considera um sistema de coleta do biogás com uma eficiência η_{col} , permitindo o escape para a atmosfera através da camada de cobertura, onde ocorre uma oxidação parcial do metano. O biogás coletado é destinado a processos de combustão, seja por meio de queimadores (*flares*), seja em sua utilização em MCI para geração de energia elétrica. Tais processos de combustão implicam na emissão de gases de exaustão ricos em dióxido de carbono. Na **Figura 19** é detalhado o modelo de aterro sanitário adotado.

Figura 19 - Diagrama representativo do modelo adotado de aterro sanitário.



Fonte: Elaboração própria.

A partir do diagrama mostrado na Figura 8, nota-se o fluxo de RSU oriundo das áreas urbanas atendidas pelo aterro, bem como fluxos mássicos de biogás, podendo-se destacar a vazão total de biogás gerado (m_{bt}), a vazão de biogás coletado (m_{bc}) e o biogás perdido para a camada de cobertura (m_{be}). A atmosfera recebe as emissões de CO_2 proveniente da queima do biogás coletado e oxidado, bem como o CH_4 perdido diretamente pelas fugas decorrentes da ineficiência inerente ao sistema de coleta.

A vazão m_{bt} se relaciona com a previsão de geração de biogás, apresentando-se na forma de uma vazão média anual.

As vazões m_{bc} e m_{be} são calculadas com a aplicação da eficiência do sistema de coleta (n_{col}) de acordo com as equações (2) e (3):

$$m_{bc} = m_{bt} \times n_{col} \quad (2)$$

$$m_{be} = m_{bt} \times (1 - n_{col}) \quad (3)$$

O processo de oxidação do biogás se dá na reação de uma parte do metano com o oxigênio. A quantidade de metano reagido nesse processo é dada pela fração de oxidação (f_o), calculada por Liptay et al. (1998) em 10% a partir de medições realizadas em seis aterros sanitários nos Estados Unidos por meio da assinatura isotópica do metano gerado nesses aterros.

A equação de oxidação (combustão do metano) é dada pela equação (4):



3.1.3.1.2 *Queimadores (flares)*

O queimador (*flare*), ou tocha é um equipamento utilizado para a destruição do metano através da reação de combustão e consequente conversão em dióxido de carbono. Além de questões de segurança do aterro, este processo tem a importância de reduzir as emissões de metano diretamente na atmosfera, tendo este gás um potencial de aquecimento global pelo menos 25 vezes maior do que o dióxido de carbono atmosfera (FERRAZ DE CAMPOS et al., 2021a).

3.1.3.1.3 *Modelos de previsão de produção de biogás em aterros sanitários*

Diversos modelos de previsão de produção de biogás em aterro sanitário foram desenvolvidos desde os anos 1970 a fim de se obter estimativas de geração de biogás tanto para aproveitamento energético (térmico e elétrico) quanto para quantificação de emissões de metano para a atmosfera. Tais modelos são desenvolvidos de acordo com dados disponíveis e condições de deposição dos resíduos, como solo, clima e composição dos RSU (RODRIGO-ILARRI; RODRIGO-CLAVERO, 2020).

Tais modelos são divididos em função do comportamento da produção do biogás ao longo do tempo. Modelos de ordem zero assumem uma produção temporalmente constante, sem considerar efeito da antiguidade da deposição do resíduo. Entre os modelos de ordem zero destacam-se IPCC e EPER Germany.

Modelos de primeira ordem consideram o efeito da depleção do carbono presente no resíduo ao longo do tempo, de acordo com equações exponenciais, bem como o efeito cumulativo das sucessivas deposições de RSU. Assim, são consideradas duas etapas na vida útil do aterro, a idade ativa e o período pós-fechamento. Entre os modelos de primeira ordem destacam-se na literatura nacional o LandGEM, GasSim e TNO (RODRIGO-ILARRI; RODRIGO-CLAVERO, 2020) . No Brasil há ainda um modelo nacional desenvolvido pela CETESB, software de código aberto (MÁRIO SENAGA; JOSÉ JORGE, 2006).

3.1.3.1.3.1 Modelo LandGEM

Desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA, (USEPA, 2022) a ferramenta de modelagem LandGem provou ser útil em termos de estimativa das emissões de gás de aterro sanitário, metano, dióxido de carbono, NMOCs (Non-Methane Volatile Organic Compound), incluindo alguns outros gases poluentes após a degradação de resíduos em aterros de RSU. O LandGem é um *software* baseado no processo de decaimento de primeira ordem. Ele fornece valores padrão de acordo com os dados empíricos coletados dos aterros sanitários dos EUA. Isso é útil nos casos em que há falta de informações de atividades específicas do país.

As equações abaixo descrevem o modelo de estimação de produção de biogás do LandGEM:

$$Q_{A,CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_0 \left(\frac{M_n}{10} \right) e^{-kt} \quad (5)$$

Onde:

Q_{A,CH_4} é a geração total anual de metano (m³/ano);

i é o incremento temporal de 1 ano;

n : (ano do cálculo) - (ano inicial);

j é o incremento temporal de 0,1 ano;

k é a taxa de produção de metano;

L_0 é a constante potencial de produção de metano (m³/t);

M_n é a massa de RSU depositada do n ésimo ano (t/ano);

3.1.3.1.3.2 Modelo Biogás (CETESB)

O modelo Biogás foi desenvolvido pela (CETESB, 2006) para estimação da produção de biogás em aterros sanitários, bem como de geração de energia elétrica com o biogás. As equações abaixo descrevem o modelo:

$$\sum Q_{A,CH_4} = kL_0 \sum (M_n e^{-k(n-T)}) \quad (6)$$

Em que:

Q_{A,CH_4} é a vazão total anual de metano (m^3 /ano);

k é a constante de decaimento (1/ano);

L_0 é a constante de potencial de produção de metano (m^3 /kg);

M_n é o fluxo de RSU no n ésimo ano (t/ano);

n é o ano atual;

T é o ano de deposição do RSU.

O biogás produzido pelo processo de DA nas células do aterro sanitário aflora à superfície, sendo captado por um sistema de poços com tubulações apropriadas. Uma parte deste biogás é perdido para atmosfera sem ser captado, sendo denominadas perdas fugitivas. A relação entre o volume gás coletado e o gerado no aterro é denominado eficiência de coleta (η_{col}), de modo que o volume de gás coletado Q_{col} [m^3 /ano] é calculado com a equação (6):

$$Q_{col} = Q_A \cdot \eta_{col} \quad (7)$$

Em que Q_A é o volume de biogás produzido no aterro sanitário, com as equações (5) e (6).

O volume de biogás [m^3 /ano] perdido para a atmosfera por meio das emissões fugitivas é calculado com a equação (8):

$$Q_L = Q_A \cdot (1 - \eta_{col}) \quad (8)$$

3.1.3.1.3.3 Determinação dos parâmetros k e L_0

Ambos os modelos estudados são do tipo primeira ordem e utilizam parâmetros de entrada semelhantes para seu equacionamento. Entre os parâmetros tem-se a constante de decaimento k (1/ano), que influencia em quão rápido a taxa de geração de metano cresce ou decresce antes e após o pico, que coincide com o fechamento do aterro. Este fator se relaciona com as proporções entre resíduos rapidamente, moderadamente e lentamente degradáveis entre os componentes dos RSU.

A taxa de potencial de produção de metano L_0 (m³/t) diz respeito ao volume esperado de metano produzido em relação à massa anual de RSU aterrado. Essa taxa está relacionada à composição dos RSU e taxas de geração de metano esperadas para cada parte da fração orgânica.

Os valores k e L_0 de um resíduo ou fração de resíduo são determinados experimentalmente por meio da avaliação da taxa de degradação do material ao longo do tempo e da análise da composição e volume do gás produzido. No trabalho de Mou, Scheutz e Kjeldsen (2015) é descrito o processo de determinação de k e L_0 .

Para o cálculo de k e L_0 relativos ao caso em estudo, foi considerada a composição gravimétrica detalhada dos RSU coletados na cidade de Guaratinguetá - SP, conforme **Tabela 8**:

Tabela 8 - Composição gravimétrica detalhada dos RSU da cidade de Guaratinguetá -SP.

Tipo de resíduo	Fração detalhada	Velocidade da biodegradação			
		Fração	Lenta	Moderada	Rápida
Papéis e similares	Papelão	2,4%			2,4%
	Papel Branco	0,9%			0,9%
	Papel Colorido	0,6%		0,6%	
	Embalagem multicamadas	2,6%	2,6%		
Metais	Metal ferroso	1,1%			
	Alumínio	0,0%			
Vidro	Vidro incolor	2,0%			
	Vidro colorido	2,4%			
Plásticos	Plástico rígido	0,9%			
	Plástico PET	1,1%			
	Plástico filme	8,2%			
	Outros plásticos	2,3%			
Orgânicos	Madeiras	0,4%	0,4%		
	Restos alimentares	60,8%			60,8%
Rejeitos	Sanitários	8,4%		8,4%	8,4%
	Outros (tecidos, ráfias)	5,9%	5,9%		
Eletroeletrônicos	Eletrrodomésticos	0,0%			
Total		100%	8,9%	9,0%	72,6%

Fonte: (PREFEITURA MUNICIPAL DA ESTÂNCIA TURÍSTICA DE GUARATINGUETÁ/SP, 2019).

Conforme análise realizada por Amini, Reinhart e Mackie (2012) frações orgânicas foram classificadas como lentamente biodegradáveis, moderadamente biodegradáveis e rapidamente biodegradáveis. O potencial de geração de metano L_0 individual de cada fração foi fixado como na **Tabela 9**:

Tabela 9 - Potencial L_0 (m^3/t) relativo a cada componente de FORSU.

Frações orgânicas	L_0 (m^3/t)
Restos alimentares	300,7
Madeira	72,0
Papel jornal / embalagem	72,6
Outros papéis	145,8
Outros orgânicos (tecidos, ráfias, sanitários)	72,6

Fonte: Com dados de Amini, Reinhart e Mackie (2012).

Tais valores, quando não são possíveis de se encontrar na literatura, podem ser determinados experimentalmente por meio de análises de laboratório sobre a composição destes resíduos e posteriores medições e análises de regressão sobre os dados obtidos.

Tais métodos foram utilizados por Amini, Reinhart e Mackie (2012), sendo determinados os parâmetros individuais de k para as frações orgânicas de RSU lentamente, moderada e rapidamente biodegradáveis, como 0,02, 0,04 e 0,09 respectivamente.

3.1.3.2 Digestão anaeróbia em biodigestores

3.1.3.2.1 Caracterização da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU)

A análise imediata (*proximate analysis*), também chamada de análise proximal, conforme descrito por Tchobanoglous et al. (1993) consiste em realizar quatro determinações: determinação do teor de umidade, a 105 °C; teor de material combustível volátil, a 550 °C; carbono fixo; e cinzas. Com o auxílio de uma balança de precisão e uma mufla, é possível realizar a análise aproximada de uma amostra de biomassa. Tais equipamentos são mostrados na **Figura 20**:

Figura 20 - Balança de precisão e mufla para análise aproximada de biomassa.



Fonte: Arquivo pessoal.

A análise foi realizada com os equipamentos do Laboratório de Química do Instituto Politécnico de Portalegre (Portugal). Assim, em uma balança eletrônica de precisão, os cadinhos são pesados antes do uso, após secagem no forno. Após a inserção da amostra, os cadinhos são pesados novamente e então armazenados em forno a 105° por 24 horas. Após serem retirados e

esfriarem em temperatura ambiente, são novamente pesados. O cálculo dos Sólidos Totais (SV%) é feito conforme equação (9):

$$ST(\%) = \left(\frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \right) 100 \quad [\%] \quad (9)$$

Em que:

M_1 é o peso do cadinho mais após secagem em forno (g).

M_2 é o peso do cadinho mais o resíduo antes da secagem (g).

M_3 é o peso do cadinho mais o resíduo após procedimento de secagem (g).

Os cadinhos são então colocados em mufla a uma temperatura de 550°C, onde ficam por um período de 2 horas, estabilizando sua massa. Após serem retirados e resfriarem em temperatura ambiente, são novamente pesados. A porcentagem de sólidos voláteis foi calculada usando a Equação (10):

$$SV(\%) = \left(\frac{M_3 - M_4}{M_3 - M_1} \right) 100 \quad [\%] \quad (10)$$

Em que M_4 é a massa do cadinho mais o resíduo após pirólise na mufla (g).

A análise elementar (*ultimate analysis*), por sua vez, consiste na determinação dos elementos químicos do material, tais como: os teores de matéria orgânica, cinzas, cálcio, carbono, fósforo, nitrogênio e potássio, além de teores de resíduo mineral total, gordura e material solúvel. Na **Tabela 10** são mostrados alguns resultados de análises proximais realizadas por Tchobanoglous et al. (1993).

Tabela 10 - Análise imediata de alguns dos componentes do RSU

Componente de RSU	Umidade (%)	Sólidos Voláteis (SV) (%)	Carbonos Fixos (%)	Não Combustíveis (%)	MJ/kg
Resíduos Alimentares					
Mistos	70,0	21,4	3,6	5,0	4,18
Papéis mistos	10,2	75,9	8,4	5,4	15,6
Resíduos de jardinagem					
RSU indiferenciado	60,0	30,0	9,5	0,5	6,05
	21,0	52,0	7,0	20,0	11,63

Fonte: (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993)

A análise última (*ultimate analysis*) ainda permite quantificar os componentes químicos presentes em uma amostra, tais como matéria orgânica, teores de cinzas, carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre, gorduras, minerais totais e minerais solúveis.

Quanto à composição química dos RSU, Russo e Vieira (2006) realizaram um levantamento da composição química de RSU destinados ao aterro sanitário de Matosinhos, Portugal, por meio de análises elementares, obtendo-se uma formulação $C_aH_bO_cN_d$, destes resíduos. Os valores calculados são mostrados na **Tabela 11**:

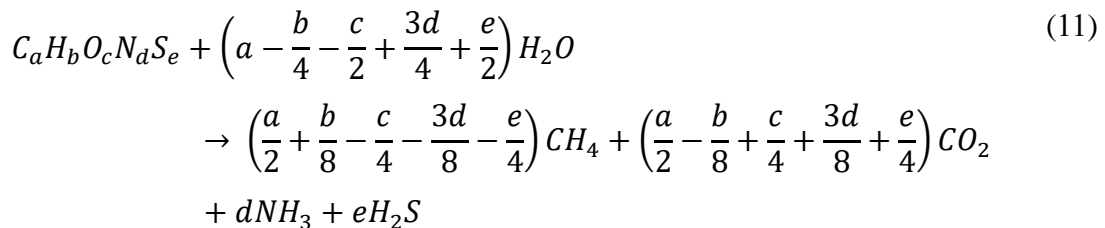
Tabela 11 - Composição química de alguns componentes dos RSU

Componente de RSU	Composição química
Resíduo alimentar	$C_{266}H_{434}O_{210}N$
Papel	$C_5H_7O_2N$
Resíduos verdes	$C_{10}H_{17}O_6N$
FORSU total	$C_{29,7}H_{45,8}O_{17}N$

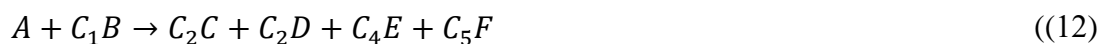
Fonte: (RUSSO; VIEIRA, 2006)

3.1.3.2.2 Digestão Anaeróbia da FORSU

A composição teórica do biogás produzido a partir de um certo substrato com uma composição química $C_aH_bO_cN_dS_e$ pode ser calculada por meio de uma equação empírica desenvolvida por Buswell e Mueller (1952) e posteriormente atualizada por Boyle (ACHINAS; EUVERINK, 2016). Assim, tem-se:



Que, de forma simplificada fica:



De modo que:

A e B são os reagentes e C, D, E e F são os produtos. As constantes ficam sendo:

$$C_1 = a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + \frac{3d}{4} + \frac{e}{2}$$

$$C_2 = \frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{2} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4}$$

$$C_3 = \frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4}$$

$$C_4 = d$$

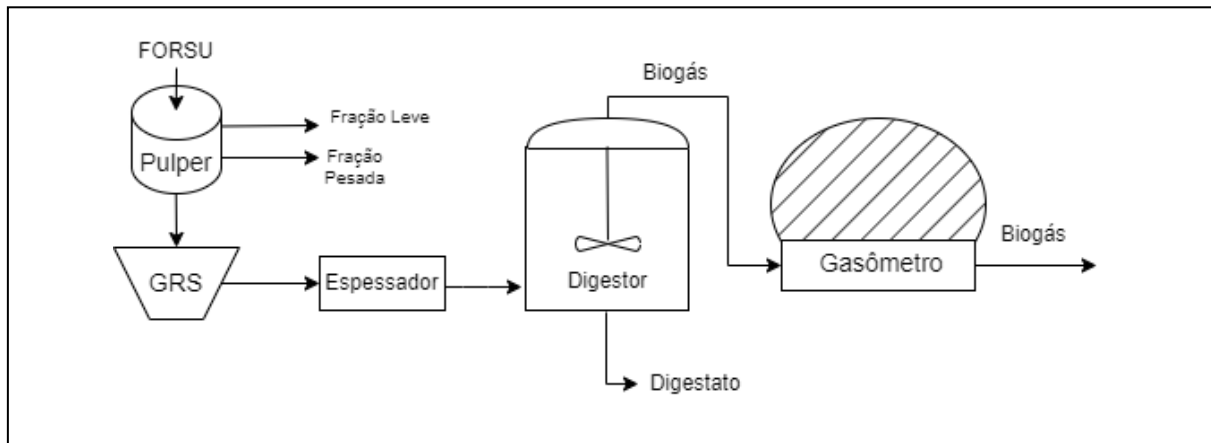
$$C_5 = e$$

3.1.3.2.3 Reatores para Digestão Anaeróbia da FORSU

Com base no processo adotado pela Central de Valorização Orgânica (CVO) da empresa portuguesa Valorlis, descritos por Gonçalves (2012), são apresentados os principais processos desde o tratamento do RSU coletado até a produção de eletricidade. Inicialmente, já nas instalações da CVO, a fração putrescível é separada a seco em um crivo rotativo de 80 mm. Após isso, é encaminhada para uma seção de triagem para separação dos plásticos.

Na etapa seguinte, a fração separada é encaminhada para um sistema de separação, com a utilização de água, de frações leves (composto por plásticos e gorduras) e pesadas (compostas por materiais grosseiros e areia) em uma série de *pulpers* culminando em uma suspensão aquosa que é encaminhada para um sistema de remoção de areia, chamado de *GRS (Grit Removal System)*. Após isto, tem-se uma suspensão de resíduo orgânico, sendo então realizado um espessamento, com o objetivo de aumentar o teor de Sólidos Totais (ST) para um valor da ordem de 10%. Tal espessamento pode ser feito por meio de processo gravítico, por flotação, centrífuga e filtro-prensa do ti

Os componentes considerados em um esquema geral de digestão anaeróbia de FORSU são mostrados na **Figura 21**.

Figura 21 - Processo de digestão anaeróbia da FORSU

Fonte: Elaboração própria, com base no diagrama apresentado por Gonçalves (2012) e Pereira (2015).

No diagrama apresentado na Figura 9 pode-se identificar o tanque de suspensão, onde a suspensão putrescível é armazenada de modo a fornecer uma alimentação contínua para o tanque digestor. Uma outra função do tanque de suspensão é dar início às primeiras etapas da digestão anaeróbia, como a hidrólise, acidogênese e acetanogênese, de modo a suprir a suspensão orgânica em um estado mais avançado de digestão, potencializando a etapa de metanogênese no reator. Ambos os tanques de suspensão e de digestão anaeróbia possuem sistemas de recirculação e agitação.

Para o tratamento FORSU a nível municipal são utilizados biodigestores de grande porte, sendo os principais tipos Waasa, Dranco, Valorga e Compogas. Cada um possui especificidades em relação a capacidade e períodos de retenção entre outras características. Remy (2018) reuniu as principais características desses biodigestores, sendo mostradas na **Tabela 12**.

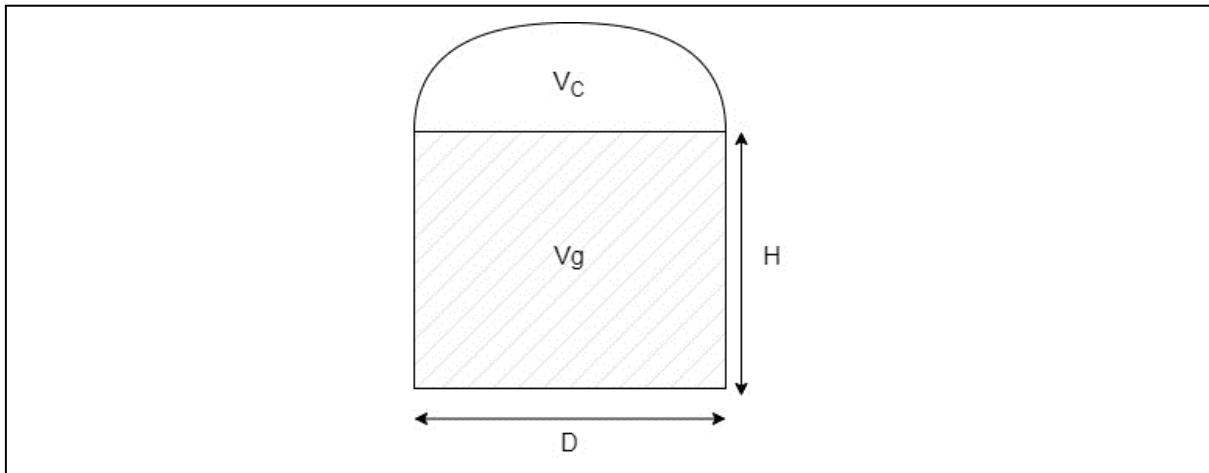
Tabela 12 - Características dos principais tipos de biodigestores de FORSU.

Tipo de biodigestor	Alimentação	Retenção (dias)	Capacidade (t/ano)	Taxa de prod. de biogás (m³/tsv)	Fonte
Waasa	Contínua	15-30	3.000-230.000	420	(CALIFORNIA DEPARTMENT OF RESOURCES RECYCLING AND RECOVERY, 2014)
Dranco	Contínua	15-20	3.000-120.000	470-620	(CALIFORNIA DEPARTMENT OF RESOURCES RECYCLING AND RECOVERY, 2014)
Valorga	Contínua	18-23	10.000-270.000	220-270	(CALIFORNIA DEPARTMENT OF RESOURCES RECYCLING, 2014)
Compogas	Contínua	15-20	16.500-110.000	300-400	(EDELMAAN; ENGELI, 2005)

3.1.3.2.3.1 Dimensionamento de digestor anaeróbio

Um reator anaeróbio convencional pode ser apresentado na forma de um tanque metálico cilíndrico onde a suspensão aquosa é retida. Sobre o tanque repousa uma cobertura de material flexível ou rígido, denominado campânula, responsável por reter o gás no interior do reator. A forma geral de um reator anaeróbio é mostrada na **Figura 22**:

Figura 22 - Dimensões de um reator anaeróbio.



Fonte: Adaptado de Njuguna Matheri et al. (2018).

Conforme proposto por Kuria e Maringa (2008), a geometria do reator pode ser calculada por um conjunto de equações em função do Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) do reator, em que o volume do tanque, V_g (m^3) é dado por:

$$V_g = Q \times TRH \quad (13)$$

Em que:

Q é a vazão afluyente de suspensão aquosa de substrato [m^3 /dia]

THR é o do Tempo de Retenção Hidráulica [dias].

O volume da campânula, V_c (m^3), é igual à metade de V_g .

O diâmetro do tanque, D (m), assumidamente igual à altura, H (m), é calculado por:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 V_g}{\pi}} \quad (14)$$

3.1.3.2.3.2 Produção de biogás

Considerando-se representativa para a região analisada, adota-se a composição dos RSU de Guaratinguetá, sendo 61,14% materiais orgânicos, 24,51% materiais recicláveis (plástico, vidro, papel e metal) e 14,35% de rejeitos. Parte-se do pressuposto de que todo esse material será submetido às condições padrão de biodigestão anaeróbia em reatores projetados

especificamente para essa finalidade. Assim, torna-se possível calcular o potencial de produção de biogás, como será apresentado a seguir, com equações adaptadas de Valente Santos (2020).

Com a equação (15) tem-se quantidade de *FORSU* disponível após triagem e tratamento do RSU:

$$M_{tRSU} = M_{fo} + M_{rec} + M_{rej} \quad (15)$$

Em que M_{tRSU} é o total de RSU coletado (t/dia), M_{Rej} é a fração de rejeitos dos RSU destinada ao aterro sanitário (t/dia) e M_{rec} é o total de RSU separado para reciclagem (t/dia).

Com a equação (16) tem-se a parcela de Sólidos Voláteis (SV) presentes na FORSU, que é processada na digestão anaeróbia e convertida em biogás:

$$SV_F = M_{fo} \times \eta_{SV} \quad (16)$$

Em que SV_F [t/dia] é o total de SV contidos na fração orgânica dos resíduos e η_{SV} é o percentual de matéria volátil (SV%).

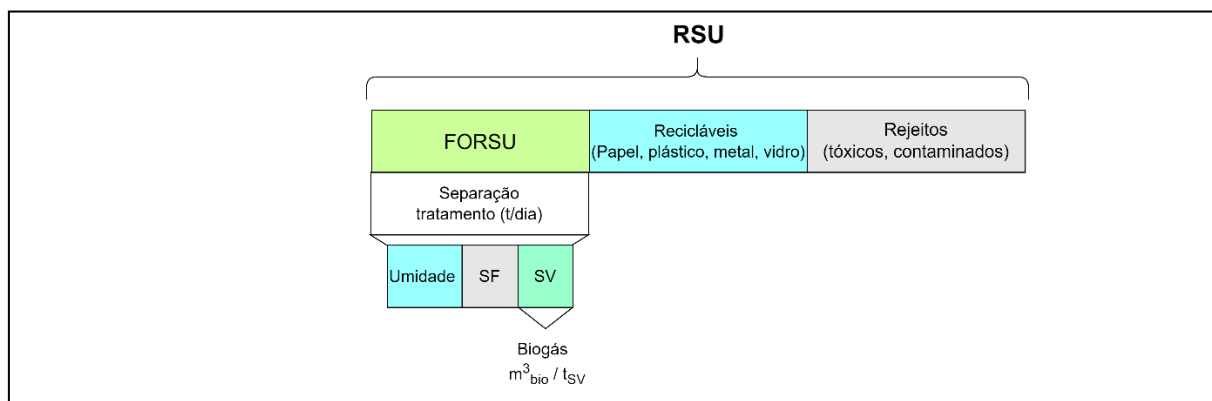
O potencial de produção de biogás é dado pela equação (17):

$$m_{bio} = SV_F \times \eta_{bio} \quad (17)$$

Em que m_{Bio} (kg/dia) é a massa de biogás produzida diariamente pela digestão anaeróbia da FORSU, η_{bio} ($m^3_{biogás}/t_{SV}$) é a taxa de conversão de SV em biogás.

Na **Figura 23** são ilustrados os componentes dos RSU tratados, mostrando a separação da FORSU e suas componentes.

Figura 23 - Separação da FORSU com seus respectivos componentes para produção de biogás.



Fonte: Elaboração própria.

Como mostrado na **Figura 23**, se identificam na FORSU a sua fração úmida, os Sólidos Fixos e os Sólidos Voláteis, passivos de biodegradação, com potencial de produção de biogás η_{bio} ($m^3_{biogás}/t_{sv}$).

3.1.4 Gaseificação de RSU

3.1.4.1 Caracterização do RSU a ser gaseificado

Considerando o objetivo de se analisar um processo de gaseificação de RSU para produção de *syngas* e posterior geração de energia elétrica, buscou-se na literatura trabalhos envolvendo a gaseificação de resíduos contando um ou mais componentes dos RSU, visando ao menos produção do *syngas* aproveitável para utilização em MCI. Os principais parâmetros, tanto dos resíduos utilizados na gaseificação quanto do *syngas*, são mostrados na **Tabela 13**.

Tabela 13 - Gaseificação de RSU e composição do *syngas* obtido.

Referência	Saravanakumar et al. (2022)	Vonk et al. (2019)	Mojaver et al. (2022)	Boloy et al. (2011)	
Resíduo gaseificado	Papel/cartão (45%) Plástico (33%) Borracha/têxtil (12,7%) Madeira (9,3%)	Cavaco de madeira	Plástico Polietileno	Cavaco de madeira	
Tipo de gaseificador	Downdraft	Downdraft	Downdraft	Downdraft	
Componente do gás	Composição do <i>syngas</i> (%mol)				Desvio padrão
H ₂	23,8%	16,9%	22,2%	24,9%	3,5%
CO	21,5%	18,1%	23,5%	19,7%	2,3%
CO ₂	5,8%	13,9%	1,4%	10,1%	5,4%
CH ₄	3,0%	2,5%	0,03%	0,9%	1,4%
N ₂	45,9%	47,9%	52,7%	44,4%	3,6%
O ₂	-	-	-	-	-
Outros	-	0,7%	-	-	-
PCI (MJ/kg)	6,62	5,4	4,88	4,53	1,03
Eficiência a gás frio	63,03%	52%	N.D.	69%	8,6%
Taxa de produção de <i>syngas</i> (m ³ /kg _{RSU})	1,93	1,54	N.D.	2,55	0,51

Uma análise destes valores, aplicando-se o desvio padrão das concentrações dos componentes do *syngas*, bem como seus respectivos PCI e eficiência de gás frio, evidencia uma baixa variação nos parâmetros, o que reforça a consistência na estimativa dos cálculos de potenciais de produção de *syngas* a partir de RSU e posterior geração de eletricidade.

Os cenários considerados na presente análise consideram a possibilidade da gaseificação de RSU em uma forma mais completa, conforme analisado experimentalmente por Saravanakumar et al. (2022), com dados mostrados na **Tabela 13**. Nesse trabalho, um gaseificador do tipo *downdraft* foi adaptado para o processamento de RSU cru após pré-tratamento para remoção de frações orgânicas, restando um resíduo composto por papel e cartão (45% em massa), plástico (33%), borracha e material têxtil (12,7%) e madeira (9,3%). A eficiência de gás frio do processo analisado foi de no mínimo 63,03%, entre diferentes ensaios. Um gás de síntese com PCI de 6,62 MJ/kg foi produzido a uma taxa de 1,93 m³ por kg de resíduo.

Em aplicações de geração de energia, em que o gás combustível precisa ser resfriado antes de ser convertido em trabalho mecânico nos MCI, o desempenho de um processo de gaseificação pode ser avaliado por meio de sua eficiência a frio que, de acordo com Basu (2010), é dada por:

$$\eta_{frio} = \frac{m_{r,s} \cdot PCI_{r,s}}{m_{c,s} \cdot PCI_{syn}} 100 \quad [\%] \quad (18)$$

Em que :

$m_{r,s}$ - fluxo mássico de resíduo sólido a ser gaseificado [kg/h]

$m_{c,s}$ - fluxo mássico de gás de síntese produzido [kg/h]

$PCI_{r,s}$ - Poder Calorífico Inferior (PCI) do combustível sólido [MJ/kg]

PCI_{syn} - Poder Calorífico Inferior (PCI) do combustível gás de síntese [MJ/kg].

Segundo Pérez (2016) este valor usualmente se encontra entre 29 e 80%, sendo observado um valor médio de 60% em instalações do porte de plantas piloto. Maiores eficiências a frio podem ser atingidas com uso de madeira como combustível sólido.

No mercado de equipamentos, os gaseificadores muitas vezes são dimensionados de acordo com sua capacidade mássica de gaseificação (kg/h) ou então pela sua potência de fornecimento de *syngas* (kW), que pode ser calculada com a equação (19):

$$P_{c,s} = \dot{m}_{c,s} \cdot PCI_{syn} \quad (19)$$

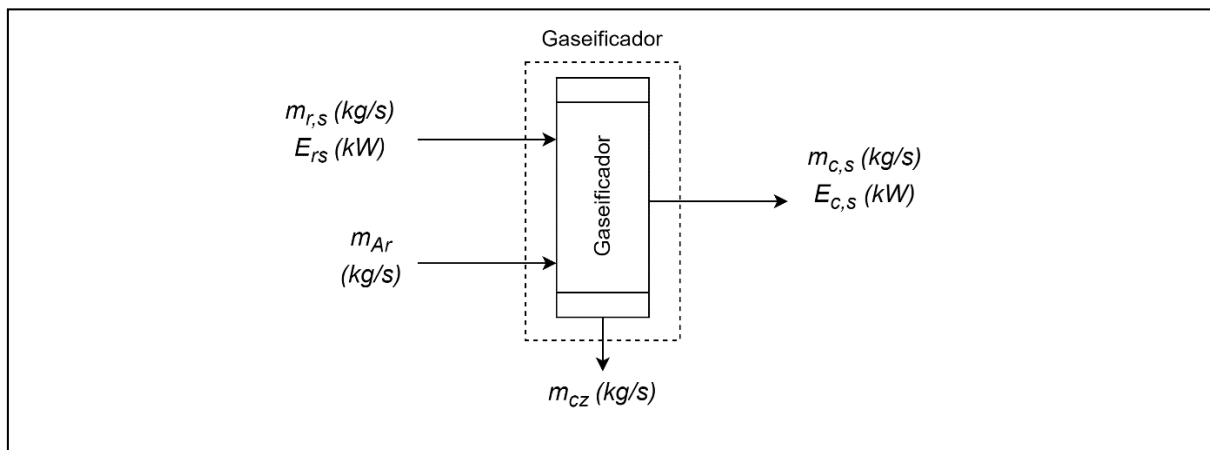
Em que $\dot{m}_{c,s}$ é o fluxo mássico de gás de síntese na saída do gaseificador [kg/s].

3.1.4.2 Sistema de gaseificação de RSU

Para este trabalho, analisa-se um sistema em que o combustível sólido alimenta um gaseificador do tipo downdraft, a exemplo do sistema experimentado por Saravanakumar et al. (2022), em que o combustível sólido é fornecido em sua entrada de alimentação. O resíduo, composto por RSU triturado pós-triagem, é composto por papel e cartão (45%), plástico (33%), borracha e têxteis (12,7%) e madeira (9,3%), conforme **Tabela 13**.

O processo de gaseificação considerado, com suas entradas e saídas de massa, pode ser ilustrado conforme diagrama mostrado na **Figura 24**:

Figura 24 - Sistema gaseificador de RSU.

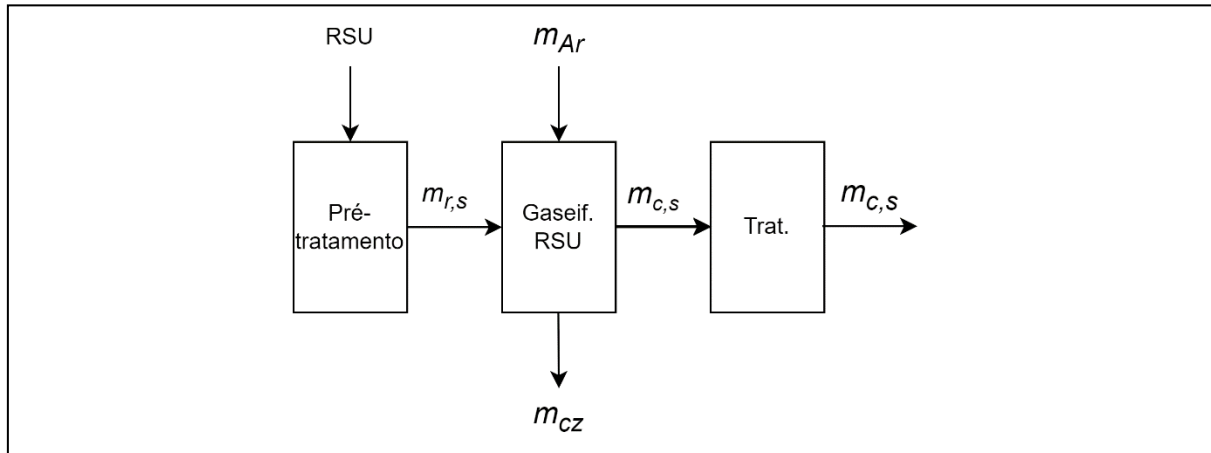


Fonte: Elaboração própria.

Na **Figura 24** são mostradas as entradas e saídas na fronteira do sistema gaseificador de RSU (G-RSU) com respectivas entradas de RSU ($m_{r,s}$), de ar (m_{Ar}) e os fluxos de saída de *syngas* ($m_{c,s}$) e de cinzas (m_{cz}) e perdas por ineficiência.

O sistema completo, considerando gaseificação dos RSU e utilização do *syngas* em MCI é mostrado na **Figura 25**:

Figura 25 - Sistema de geração de energia elétrica com *syngas* de RSU e MCI.



Fonte: Elaboração própria.

A geração de energia elétrica a partir do *syngas* é feita por meio de sua combustão em MCI adaptados para este combustível e o seu dimensionamento é assumido de forma igual ao sistema com biogás, descrito anteriormente.

3.1.5 Utilização de *syngas* e biogás em MCI

No uso de combustíveis para a geração de energia, o coeficiente de excesso de ar reflete a razão entre as massas de ar real e estequiométrica necessária para a combustão completa do combustível. Quando essa relação é inferior a 1, ocorre uma deficiência de ar, resultando em gases de exaustão contendo subprodutos de combustão incompleta, caracterizando um cenário de desperdício de energia. Em contrapartida, um excesso de ar, indicado por uma relação superior a 1, caracteriza uma condição na de perda de calor por meio dos gases de exaustão.

De acordo com Boloy et al., (2011), o excesso de ar (α) na queima de um combustível gasoso em Motores de Combustão Interna (MCI) pode ser considerado em torno de 40%. A composição do ar considerada é apresentada na **Tabela 14**.

Tabela 14 - Composição em volume e massa do ar.

Componente	Volume (%)	Massa Molar (g/mol)	Massa (%)
O ₂	21	32	23,30
N ₂	79	28,02	76,70
Total	100	28,86	100

A combustão tanto do biogas como do *syngas* foi determinada utilizando o software Gaseq, versão 0.79. Este programa de computador, desenvolvido por (MORLEY, 2005), é utilizado para o cálculo do equilíbrio químico de um gás perfeito.

Para a devida inserção dos parâmetros de reagentes nas entradas de dados do software, foram determinadas as equações de reação de combustão dos respectivos gases, com a composição do biogás e do *syngas* conforme **Tabela 10** e **Tabela 13**.

A quantidade de energia mecânica a ser fornecida no eixo do MCI está diretamente ligada à energia disponibilizada pelo combustível E_C [MJ], que pode ser calculada com a equação (20).

$$E_C = m_C \cdot PCI_C \quad (20)$$

Em que:

m_C – Massa de combustível consumida [kg]

PCI_C – Poder Calorífico Inferior do combustível [MJ/kg].

A relação entre a energia mecânica de eixo e a disponibilizada pelo combustível resulta em uma eficiência de conversão, η_{MCI} [-]. De acordo com Sales (2008), essa eficiência varia entre 25% e 45%, dependendo do sistema de geração.

$$\eta_{MCI} = \frac{E_{MCI}}{E_C} \quad (21)$$

Onde:

E_{MCI} – Energia disponibilizada no eixo do MCI [MJ]

E_C – Energia disponibilizada pela queima do combustível no MCI [MJ]

Os MCI a gás são projetados para o uso de gás natural e, quando empregados com combustíveis gasosos de menor Poder Calorífico Inferior (PCI), como biogás e gás de síntese, observa-se uma alteração no desempenho global do motor, especialmente em relação à geração e à eficiência elétrica (WANG, et al. 2015).

Quando um combustível diferente do gás natural é utilizado nestes motores, apresentando um valor inferior de PCI, (WANG et al., 2015) propõem a equação (22) para o cálculo da eficiência elétrica, considerando um fator de correção de desempenho γ_{Comb} [-].

$$\eta_{el} = \gamma_{Comb} \cdot \eta_{MCI}^* \cdot \eta_G \quad (22)$$

*Condições normais de operação do MCI, adotando-se como combustível o gás natural.

Em que:

η_G é o coeficiente relativo à eficiência do gerador elétrico [%].

O fator de correção da eficiência do MCI em função da utilização de um combustível com menor PCI é calculado com a equação (23).

$$\gamma_{Comb} = 0,102 \cdot \frac{PCI_C}{PCI_{GN}} + 0,897 \quad (23)$$

Onde:

- PCI_C é o Poder Calorífico Inferior do combustível gasoso utilizado no MCI [MJ/kg]

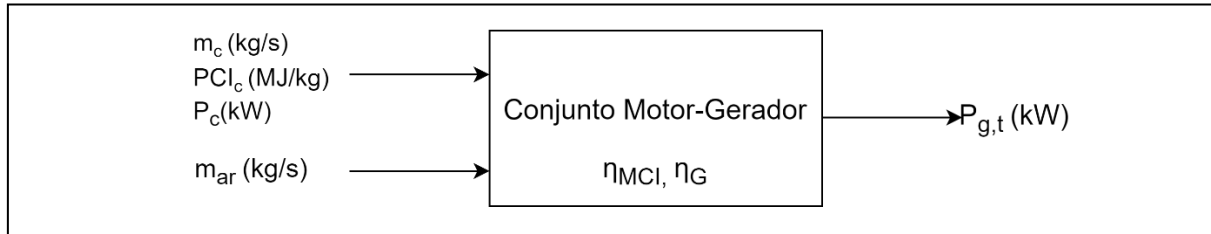
- PCI_{GN} é o Poder Calorífico Inferior do gás natural [MJ/kg].

3.1.5.1 Geração de energia elétrica com MCI operando com biogás ou gás de síntese

A geração de energia elétrica é realizada em grupos motor-gerador, em que um MCI é alimentado por uma vazão de combustível gasoso (m_{comb}), *syngas* ou biogás, que na sua combustão, tem sua energia química liberada na forma de calor, o qual é parcialmente convertido em movimento oscilatório do eixo mecânico. Tal eixo é acoplado a um gerador elétrico que converte o torque mecânico em energia elétrica, E_g (kWh). Gases de exaustão, m_{ex}

e perdas térmicas por dissipação E_d também são mostradas. A representação deste sistema é mostrada na Figura 26.

Figura 26 - Representação do conjunto motor-gerador.



Fonte: Elaboração própria.

Assim, calcula-se o potencial elétrico (kWh/dia) em função do volume de biogás efetivamente coletado anualmente.

$$E_{g,t} = \frac{m_c \cdot PCI_c \cdot \eta_{el}}{3,6} \quad (24)$$

Em que m_c é a vazão mássica do combustível gasoso (kg/dia), PCI_c é o Poder Calorífico Inferior do combustível admitido no MCI. O fator de correção igual a 3,6 é aplicado para conversão da unidade MJ para kWh.

Uma vez calculado o potencial de geração elétrica, calcula-se a potência instalada (MW) do sistema gerador capaz de gerar o respectivo montante energético:

$$P_{g,t} = \frac{E_{g,t}}{8760 \cdot FC} \quad (25)$$

Em que $E_{g,t}$ é o potencial de geração elétrica [kWh] e FC é Fator de Capacidade da planta, entre 0 e 1, aplicado ao total de horas do ano, 8760.

De acordo com dados do World Energy Council (WEC), em parceria com a Bloomberg New Energy Finance (2013), aplicados na estimativa de custos de energia da Empresa de Pesquisa Energética (2021) o fator de capacidade de usinas termoelétricas com utilização de biomassa de RSU é de 80%.

3.1.6 Geração de energia elétrica com Sistema Solar Fotovoltaico

Este cálculo determina a capacidade do sistema dimensionado para suprir a demanda, fornecendo, no período de um dia, energia na mesma quantidade solicitada pela carga. Através da aplicação da equação (26) abaixo, determina-se a potência nominal, $P_{g,fv}$ [kW], instalada necessária para atender à demanda elétrica diária de uma dada carga E_l [kWh] (MAHMOUD; IBRIK, 2006).

$$P_{g,fv} = \frac{E_l}{n_V n_R HSP} \quad (26)$$

onde:

E_l - Demanda energética diária solicitada pela carga [kWh],

n_V e n_R são eficiências dos componentes do sistema,

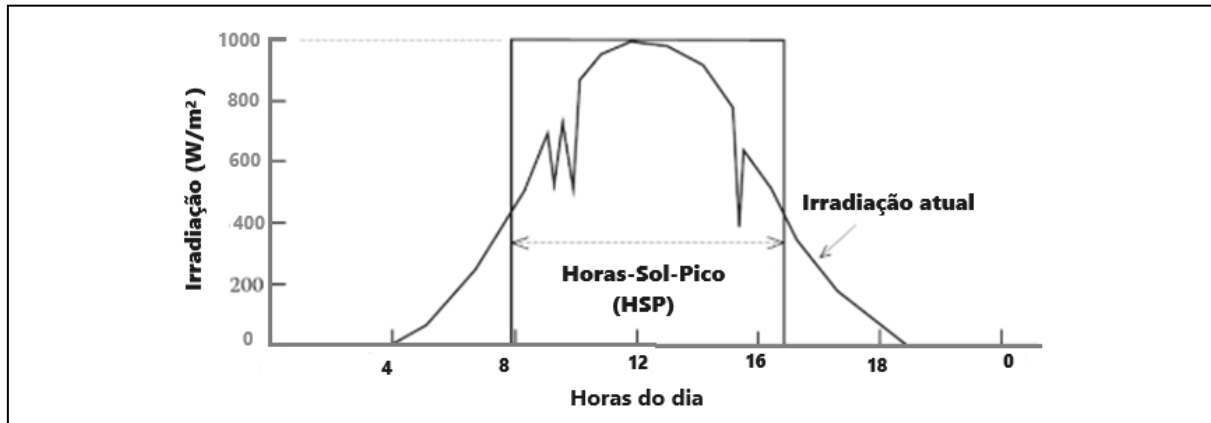
HSP são as Horas-Sol-Pico [h]

Os painéis solares são a única fonte de energia em um sistema fotovoltaico. A energia fornecida por um painel fotovoltaico depende da irradiação solar incidente em sua superfície. Apesar de que variáveis como temperatura e velocidade do vento também influenciam de alguma maneira no desempenho do sistema, levando a perdas térmicas e resistivas devido a influência da temperatura nas células fotovoltaicas, não foram consideradas diretamente neste trabalho, optando-se pela adoção de um fator de segurança.

Como os parâmetros de um sistema fotovoltaico são calculados para uma irradiação solar de 1 kW/m^2 e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, as Horas-Sol-Pico (HSP) são frequentemente utilizadas para representar a irradiação solar. As HSP são o período teórico diário, em horas, e com irradiação solar no valor de 1 kW/m^2 , necessário para produzir uma irradiação obtida pela integração da irradiação solar ao longo de todo o período iluminado do dia (MESSENGER; VENTRE, 2004a).

Assim, a irradiação solar diária é numericamente igual ao HSP, conforme mostrado na **Figura 27**.

Figura 27 - Equivalência entre a irradiação diária (W/m^2) e quantidade de Horas-Sol-Pico (HSP)



Fonte: Adaptado de Messenger e Ventre (2004).

Sendo a irradiação solar variável no decorrer do dia, a potência instantânea de geração pode ser calculada em função da irradiação solar num dado momento, conforme equação (27), conforme descrito por Markvart e Castañer (2003):

$$P_{fv,i} = P_{g,fv} \cdot G_i \cdot A_e \cdot n_V \cdot n_R \quad (27)$$

Em que:

$P_{fv,i}$ [kW] é a potência elétrica gerada em um dado instante,

$P_{g,fv}$ [kW] é a potência nominal de um sistema fotovoltaico,

G_i [kW/m^2] é a irradiação solar incidente em um dado momento,

A_e [m^2/kW] é a relação entre a área instalada de painéis e a potência nominal,

De acordo com a fabricante de painéis solares Canadian Solar, um painel do tipo Monocristalino PERC possui eficiência de 20,5%, com potência de 530 W e área $2,58 \text{ m}^2$, tendo, portanto, uma razão de $4,87 \text{ m}^2/\text{kW}$.

3.1.7 Produção de hidrogênio

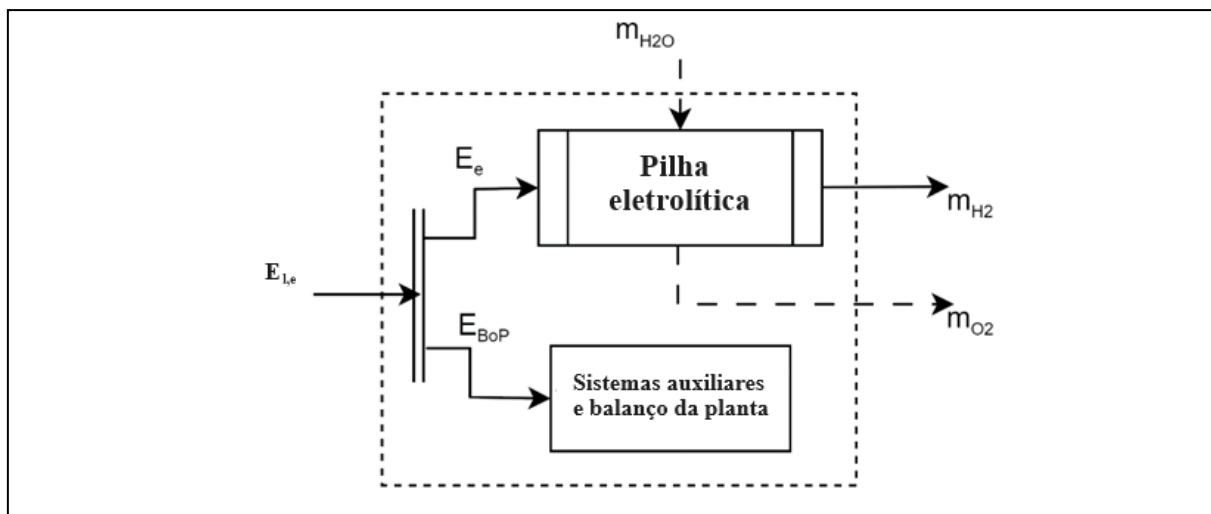
3.1.7.1 Eletrolisador

O eletrolisador, segundo descrito por Kotowicz et al. (2017), é um dispositivo empregado na produção de hidrogênio, abrangendo a célula eletrolítica, subsistemas auxiliares

como os de bombeamento, conversão de corrente, controle e medição e purificação de hidrogênio. Devido ao consumo de energia nessas operações, é essencial considerar esses subsistemas na análise energética.

Na **Figura 28** é mostrado o diagrama de processos e consumos elétricos do eletrolisador, assim como seus fluxos de energia e massa.

Figura 28 - Principais subsistemas considerados nos cálculos envolvendo o eletrolisador.



Fonte: Adaptado de Kotowicz et al. (2017).

Na **Figura 28** pode ser observada a entrada de energia elétrica em corrente alternada (CA) consumida pelo eletrolisador, $E_{l,e}$. A pilha eletrolítica, por sua vez, recebe um fluxo \dot{m}_{H_2O} de água, dando origem ao oxigênio \dot{m}_{O_2} e hidrogênio \dot{m}_{H_2} . Tal processo consome um fluxo de energia \dot{E}_e , com eficiência η_e . Em seguida o hidrogênio é condicionado, medido e purificado pelos sistemas auxiliares, relacionados a um consumo elétrico \dot{E}_{BoP} .

Considerando o potencial diário de geração elétrica proveniente do biogás produzido, presume-se que esse potencial pode ser empregado no procedimento de eletrólise para a produção de hidrogênio. A eficiência da pilha eletrolítica é dada por uma razão entre a potência disponível na forma de hidrogênio e a potência elétrica de entrada no eletrolisador, e é dada pela equação (28) (HOSSEINI; DINCER; ROSEN, 2013):

$$\eta_e = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot PCI_{H_2}}{P_e} \quad (28)$$

Em que η_e é a eficiência do eletrolisador do tipo PEM (62%), \dot{m}_{H_2} é o fluxo de massa de hidrogênio na saída do eletrolisador [kg/h], PCI_{H_2} é o PCI do hidrogênio (33,3 kWh/kg (STAFFELL, 2011), e $P_{l,e}$ é a potência elétrica consumida pelo eletrolisador.

Ainda, o consumo elétrico no eletrolisador compreende consumo de balanço da planta, em que cargas elétricas como bombas, sensores e controladores compõem uma demanda extra de eletricidade. Para eletrolisadores PEM de baixa temperatura, pode-se considerar um consumo C_{BoP} de 2,45 kWh_{AC}/kg_{H2} (XI et al., 2023).

Assim, o consumo diário de energia pelo conjunto completo eletrolisador é calculado em função de sua potência e do tempo de operação, conforme mostrado na equação (29).

$$E_{l,e} = P_e \cdot t_h + C_{BoP} \cdot m_{H_2} \quad (29)$$

Em que P_e (kW) é a potência da pilha do eletrolisador, t_h (h/dia) é o tempo de operação da planta, C_{BoP} (kWh/kg_{H2}) é o consumo específico do balanço da planta e m_{H_2} (kg/dia) é a vazão diária de hidrogênio produzida. A razão entre $E_{l,e}$ e (kWh/dia) e seu tempo de operação (t_h) é denominada como a potência do eletrolisador ($P_{l,e}$).

3.1.7.2 Compressão do hidrogênio

A maneira mais eficiente de se comprimir um gás é através de um processo de compressão adiabática. A potência de eixo nominal de um compressor pode ser expressa por meio da equação (30) (LI et al., 2009):

$$\dot{E}_{l,comp} = C_{comp} \frac{T_1}{\eta_{comp}} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{r-1}{r}} - 1 \right) \dot{m}_{H_2} \quad (30)$$

Onde:

C_{comp} é o calor específico do hidrogênio a pressão constante (14304 kJ (kg/k)

T_1 é a temperatura de entrada do hidrogênio no compressor (293 K)

P_1 e P_2 são as pressões de entrada e saída do compressor (bar)

r é a razão dos calores específicos do hidrogênio (1,4)

\dot{m}_{H_2} é a taxa de fluxo mássico de gás através do compressor (kg/s)

η_{comp} é a eficiência mecânica do compressor (%/100)

3.1.7.3 Consumo elétrico do sistema de produção de hidrogênio

O consumo elétrico considerado nesta análise compreende os processos de eletrólise, incluindo balanço da planta, e compressão do hidrogênio. Dessa forma, o consumo total de hidrogênio na planta de produção de hidrogênio pode ser expresso como:

$$E_l = E_{l,e} + E_{l,comp} \quad (31)$$

Em que $E_{l,e}$ é energia elétrica consumida pelo eletrolisador ao longo de um dia (kWh) e $E_{l,comp}$ é o consumo elétrico diário do compressor.

O consumo elétrico diário E_{cons} deve ser suprido integralmente, de modo que sua potência seja igual à soma da geração fotovoltaica ($P_{PV,i}$) e biogás (P_{Bio}) ou consumo por meio da rede elétrica nacional (P_{Grid}).

3.2 ANÁLISE AMBIENTAL

3.2.1 Eficiência ecológica

Para realizar a análise ambiental, é calculada a eficiência ecológica da planta, um indicador que leva em conta a eficiência térmica global do sistema em consideração, juntamente com as emissões de gases prejudiciais para a atmosfera. Esse parâmetro proporciona uma avaliação do nível de poluição associado à planta geradora ou cogeneradora em relação à quantidade de energia que ela está produzindo. O método de cálculo dessa eficiência foi desenvolvido por (CÂRDU; BAICA, 1999) e posteriormente aplicado por outros pesquisadores, como (CORONADO et al., 2009), (DE PAULA SANTOS et al., 2022) e (SOARES; DE MORAES; BOLOY, 2021).

Posteriormente, este método foi aplicado a fontes geradoras não termoeletricas, como solar e eólica (RUIZ et al., 2016a). A eficiência ecológica também foi utilizada para sistemas de conversão energética com finalidades distintas da geração elétrica, como por exemplo

veículos a célula a combustível, conforme estudado por (SOARES; DE MORAES; BOLOY, 2021). e (DE MORAES et al., 2022).

Usinas termelétricas que se utilizam da queima de carvão ou hidrocarbonetos apresentam elevadas taxas de emissões de poluentes na combustão destes materiais. Compostos nocivos ao meio ambiente, como o CO₂, NO_x e SO_x estão relacionados com o efeito estufa, ou ainda com chuvas ácidas e outros danos à saúde não apenas humana, como também à biosfera em geral, incluindo vegetais e animais. A presente análise considera a combustão completa dos combustíveis considerados, levando em conta o excesso de ar, conforme descrito na seção de análise técnica.

Para Cardu e Baica (1999), ao analisar o impacto das emissões de gases de uma planta termelétrica, é essencial considerar também a eficiência na produção de energia. Dessa forma, uma planta com alta eficiência, mesmo que ultrapasse os parâmetros estabelecidos nas normas de qualidade atmosférica para emissões prejudiciais, pode ser considerada mais ecológica do que uma planta com emissões mais baixas, mas com uma eficiência de produção muito menor.

3.2.2 Emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e})

De acordo com (BOLOY et al., 2011) o de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) é composto por uma concentração hipotética de fatores de emissões de poluentes. Dessa maneira, pode-se representar as emissões de diferentes poluentes em função de coeficientes para a equivalência desses poluentes em termos de quantidades equivalentes de emissões de dióxido de carbono. De acordo com (CORONADO et al., 2009), para o cálculo desses coeficientes, são divide-se a máxima concentração admissível de CO₂ pelo valor padrão correspondente para Material Particulado (MP), Nox e SO₂. Assim, a expressão para o cálculo do CO_{2e} é dada por:

$$CO_{2e} = CO_2 + 80SO_2 + 50NO_x + 67MP \quad (32)$$

Do ponto de vista ecológico, o melhor combustível é o que resulta em uma menor emissão de CO₂ em sua combustão. Assim, afim de se analisar o impacto relacionado à combustão de um determinado combustível, é utilizado o indicador de poluição (Π_g), sendo dado por:

$$\Pi_g = \frac{CO_{2e}}{PCI_{Comb}} \quad (33)$$

Sendo CO_{2e} e PCI_{Comb} expressos em kg por massa de combustível e em MJ/kg, respectivamente.

3.2.3 Eficiência Ecológica

Uma vez que o indicador de poluição tenha sido calculado, torna-se possível realizar o cálculo da Eficiência Ecológica (ε) conforme representado pela equação (34). Esta formulação foi proposta inicialmente por Cardu e Baica (1999) para termelétricas e pode ser expressa como:

$$\varepsilon = \left[\frac{0,204 \cdot \eta_g}{\eta_g + \Pi_g} \cdot \ln (135 - \Pi_g) \right]^{0,5} \quad (34)$$

Em que:

η_g é a eficiência de conversão elétrica da planta [%].

Π_g é o indicador de poluição.

Os valores de eficiência ecológica podem variar entre 0 e 1, sendo 0 indicativo de uma planta plenamente ineficiente do ponto de vista ecológico, ou seja, altamente poluente, enquanto 1 representa uma planta plenamente eficiente, sem impactos ambientais. Portanto, valores mais próximos de 1 indicam um resultado melhor e uma planta menos poluente.

Fontes de geração não-termelétricas, como eólica e solar, não se baseiam na queima de combustível e, portanto, não estão relacionadas a emissões diretas de CO_{2e} . No entanto, segundo (RUIZ et al., 2016b) nestes casos, pode-se aplicar o indicador GWP. Este indicador é obtido em análises de ciclo de vida e quantifica as emissões de uma determinada fonte geradas em seus processos de fabricação, manutenção, descomissionamento e deposição final ou reciclagem.

3.2.4 Eficiência ecológica de um Sistema Híbrido de Geração Elétrica (SHGE)

No caso da adoção de um sistema híbrido de geração, composto por mais de uma fonte, cada uma está relacionada a diferentes padrões de emissões de poluentes, resultando em valores individuais de eficiências ecológicas. Assim, segundo Ruiz et al. (2016b), a eficiência ecológica

resultante de um sistema híbrido pode ser calculada com a combinação ponderada da contribuição de cada fonte na geração total, considerando suas eficiências ecológicas individuais. Essa eficiência combinada é dada por:

$$\varepsilon_H = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot E_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (35)$$

Em que ε_i e E_i representam a eficiência ecológica [%] e a geração elétrica [kWh] de cada fonte i utilizada no SHGE em um determinado período de tempo.

3.3 ANÁLISE ECONÔMICA

Segundo de Souza Ribeiro et al. (2021) e Mosayebnezhad et al. (2018) uma métrica largamente utilizada em análises econômicas de projetos de geração de energia é o custo nivelado de energia (do inglês *Levelized Cost of Energy*, *LCOE*). De Souza Ribeiro et al. (2021) utilizaram o LCOE em uma análise econômica para a geração de energia elétrica a partir de biogás de aterros sanitários.

Este indicador é utilizado para o cálculo de custo da energia elétrica gerada ao longo da vida útil de um dado projeto. Assim, pode-se calcular o custo nivelado da energia elétrica (R\$/kWh):

$$LCOE = \sum_{t=1}^n \frac{\frac{C_i + C_{O\&M}}{(1+i)^t}}{\frac{E_{el}}{(1+i)^t}} \quad (36)$$

Em que

C_i representa o custo de investimento do projeto [R\$]

$C_{O\&M}$ é o custo total anual com operação e manutenção, incluindo insumos [R\$]

E_{el} é a energia elétrica gerada num dado ano t , considerando uma vida útil n do projeto, em anos [kWh]

i é a taxa de juros adotada [%/100]

Os custos operacionais anuais com manutenção e mão de obra podem ser assumidos como 5% do investimento inicial em equipamentos, como no estudo de Lin e Haussener (2017). Custos de insumos como combustíveis devem ser adicionados aos custos operacionais totais ($C_{O\&M}$), de acordo com suas taxas de consumo e custos de aquisição.

O método LCOE pode ser aproveitado para o cálculo de custos nivelados de combustível (LCOF), conforme aplicado por Martin, Neumann e Ødegård (2023) e hidrogênio (LCOH), como analisado por Khouya (2020). Nestes casos, o termo E_{el} , que designa o montante de energia elétrica gerada em um ano (kWh), é substituído pelo montante de combustível ou hidrogênio produzido (kg).

Os custos de aquisição de equipamentos foram levantados na literatura. Tais valores foram convertidos para Real, conforme cotações verificadas em Janeiro de 2024, considerando Dólar a R\$ 4,86 e Euro a R\$ 5,37, atualizados pela inflação relativa ao período desde sua publicação, por meio do índice IPCA, com a calculadora de correção de valores do Banco Central do Brasil (2023). Esses valores são mostrados na **Tabela 15**.

Tabela 15 - Parâmetros de cálculo de custos operacionais e investimento.

Grupo	Item	Valor	Unidade	Comentário	Referência
RSU	Coleta	177,74	R\$/ton.	Custo da coleta	(MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2023)
	Triagem	76,64			(LIMA et al., 2022)
	Total	254,38			
Digestão Anaeróbia	Biodigestor	1944	R\$/m ³		(AL SEADI; BAXTER, 2013)
	Limpeza de gás	145,8	R\$/Nm ³ /h		(AL SEADI; BAXTER, 2013)
Aterro Sanitário	Planta completa	62.023 $P_{g,a}[kW]^{0,78}$	R\$		(SANTOS et al., 2019)
Gaseificação	Gaseificador	13.425	R\$/kW		(CARDOSO et al., 2019)
Grupo gerador	Motor-gerador	2.685	R\$/kW		(COPA et al., 2020)
Solar	Planta solar	3,0	R\$/kW		(GREENER CONSULTORIA LTDA, 2023)
	Eletrolisador	5.152	USD/kg		(TEBIBEL, 2021)
Hidrogênio	Compressor	13.323	R\$/kW		(HOLM et al., 2021)
	Tanque	2.795	USD/kg		(TEBIBEL, 2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados os resultados das análises técnica, ambiental e econômica. A ordem em que são apresentados estes resultados se relaciona com a sequência em que foram realizadas análises. Ou seja, a análise técnica fornece os subsídios necessários para que seja realizada a análise ambiental e a análise econômica. Em cada caso são apresentados também os cenários adotados nas análises.

4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE TÉCNICA

Nesse capítulo são apresentados os resultados da análise técnica. Tendo em vista uma demanda teórica de produção de hidrogênio, são apresentados os resultados de cálculos para verificação dessa demanda. Em seguida, foi dimensionada uma planta fotovoltaica capaz de atender 100% da demanda elétrica decorrente dos processos de eletrólise e compressão. São mostradas as curvas de carga do SPCH e geração elétrica considerando dimensionamentos parciais da planta fotovoltaica.

São mostradas também os resultados do dimensionamento planta termoelétrica, considerando diferentes configurações com alimentação por *syngas* e/ou biogás derivado de RSU. São abordados diferentes cenários, inclusive considerando a inserção da fonte termoelétrica de modo a complementar a planta solar fotovoltaica.

Em seguida, as duas plantas, solar fotovoltaica e termoelétrica, são analisadas em conjunto. Tais resultados são analisados de modo a se compreender o comportamento da geração elétrica total sob diferentes dimensionamentos da planta solar fotovoltaica e da termoelétrica.

Finalmente, são mostrados os resultados dos potenciais de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP, destacando sua variação ao longo da vida útil do mesmo.

4.1.1 Produção de hidrogênio com energia solar fotovoltaica

Para o estudo de caso apresentado, considerou-se a frota municipal de Guaratinguetá – SP, composta de 6 caminhões compactadores de 18 toneladas. Na hipótese da substituição desta frota de caminhões a diesel por uma equivalente a célula a combustível, com consumo de 6,18 kg_{H2}/100 km (FERRARA; JAKUBEK; HAMETNER, 2023), com rodagem diária de 70 km,

tem-se uma demanda diária de 26 kg de hidrogênio gasoso comprimido a 300 bar, pressão usual de reabastecimento de veículos pesados (CAPONI et al., 2022).

Para produzir diariamente tal quantidade de hidrogênio, é dimensionado um eletrolisador e um compressor, com as equações (28) a (31).

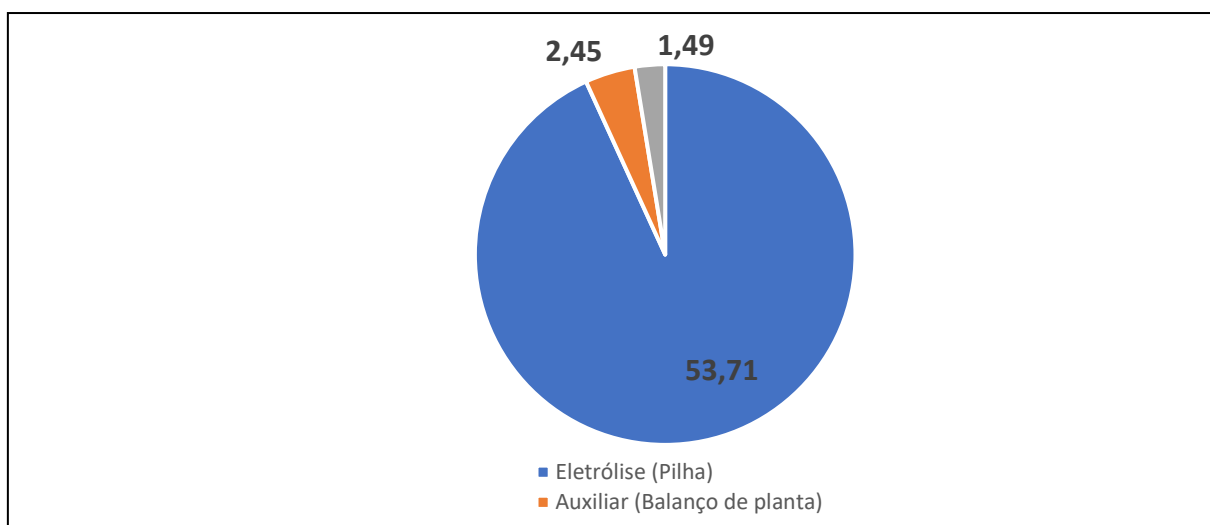
Considerando uma eficiência $[\eta_e]$ de 62%, típica para eletrolisadores do tipo PEM e um PCI_{H_2} de 33,3 kWh/kg (STAFFELL, 2011), chega-se a um consumo de 1394 kWh/dia na pilha eletrolítica. Com o consumo auxiliar e de balanço de planta C_{BoP} equivalente a 2,45 kWh_{AC}/kg_{H2} (XI et al., 2023), pelas equações (28) e (29) tem-se um consumo elétrico total de 1457,7 kWh/dia relativo à produção de hidrogênio.

O trabalho elétrico de compressão do hidrogênio desde 2, na saída do eletrolisador, a 300 bar é calculado com a equação (30). Considerando um regime de operação de 18 horas diárias, e uma eficiência elétrica do compressor de 0,90, chegou-se a um valor 38,6 kWh/dia.

Com a equação (31) o consumo elétrico total E_t [kWh] por parte do sistema de produção e compressão de hidrogênio foi calculado em 1496,3 kWh/dia. No regime de trabalho assumido de 18 horas, equivale a uma potência constante de 83,13 kW.

Colocado o consumo diário em relação à massa de hidrogênio produzida, os valores são mostrados na **Figura 29**.

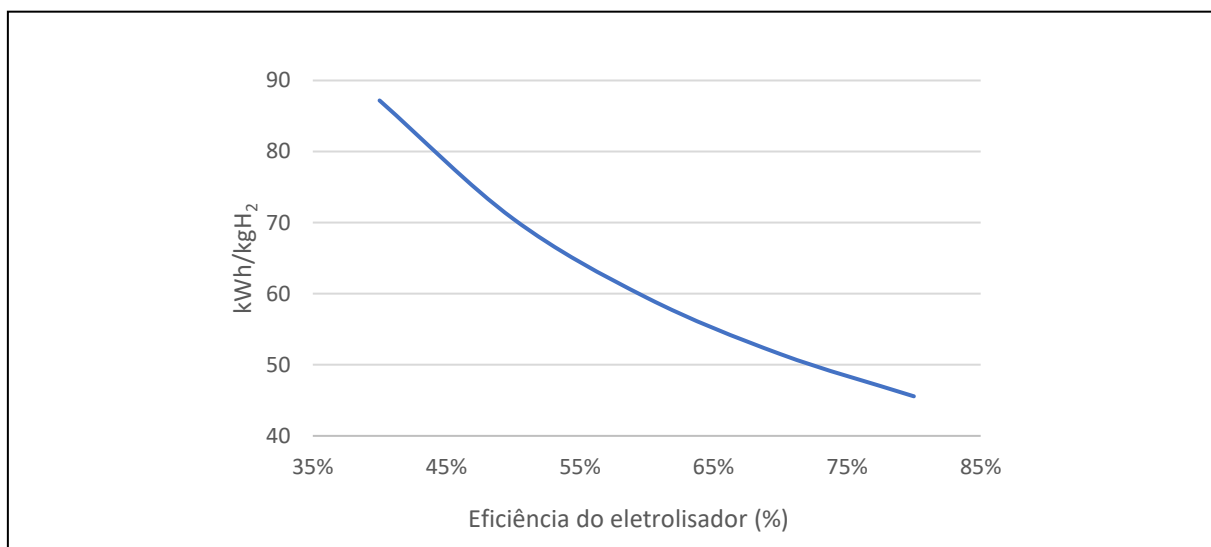
Figura 29 - Discriminação do consumo elétrico na produção de hidrogênio.



Verifica-se, assim, que a produção de hidrogênio, no processo eletrolítico, é dominante sobre o total de energia elétrica consumida. No total, são consumidos 57,6 kWh por cada quilograma produzido.

É possível inclusive calcular os consumos específicos (kWh/kg) para produção de hidrogênio com eletrólise de acordo com a eficiência da pilha eletrolítica. A partir da equação (28) foram calculadas estas demandas, chegando aos resultados conforme **Figura 30**.

Figura 30 - Consumos específicos de eletricidade para produção de hidrogênio em função da eficiência da pilha eletrolítica.



Assim, o consumo elétrico de uma pilha eletrolítica está entre 45,6 e 87,2 kWh/kg, considerando a eficiência entre um mínimo de 40 e um máximo de 80%. Tais resultados reforçam a preponderância da eficiência da pilha eletrolítica no consumo elétrico demandado na produção do hidrogênio.

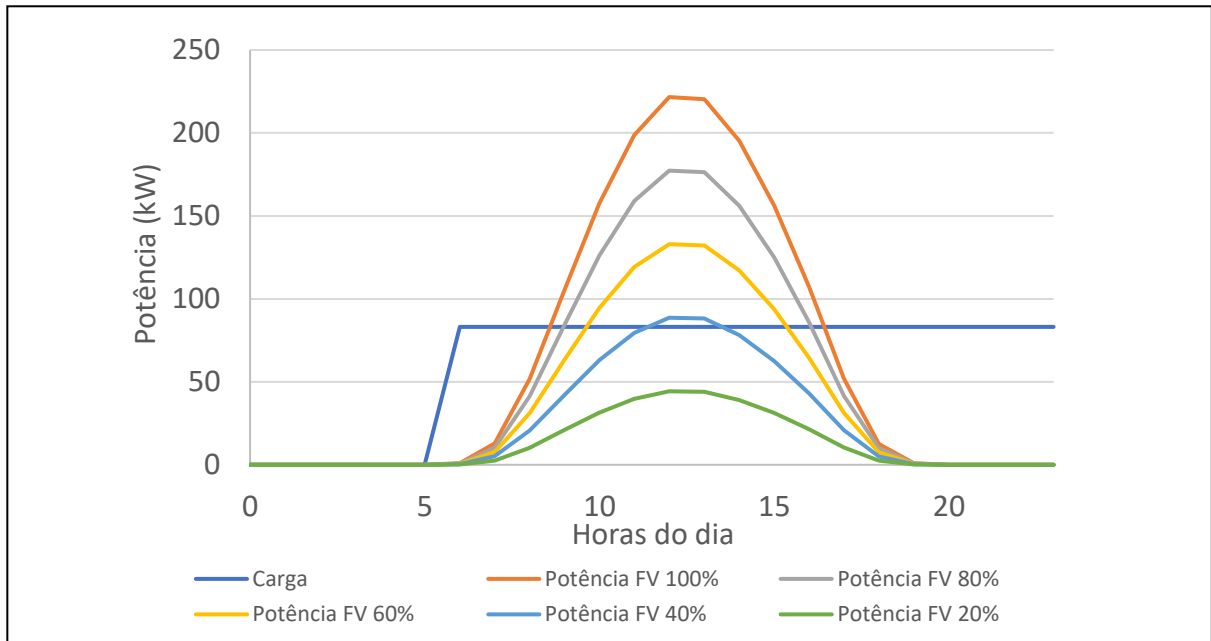
4.1.2 Sistema solar fotovoltaico

Com o consumo diário da carga (E_l), calculado em 1496,3 kWh/dia, constante por 18 horas, foi dimensionada, com a equação (26), uma planta solar fotovoltaica de 395,4 kW de potência de pico ($P_{g,fv}$), equivalente a 746 painéis de 530 W, e uma área de solo ocupada de 4480 m², se adotado o requisito médio de utilização de terras por sistemas fotovoltaicos de 11330 m²/MW, conforme Bolinger & Bolinger (2022).

Quando variada a potência de pico ($P_{g,fv}$), entre 0 e 100%, diferentes complementações energéticas são necessárias para o atendimento da carga de 83,13 kW decorrentes do sistema

de produção de hidrogênio, assim como diferentes gerações instantâneas ($P_{fv,i}$) são produzidas, sendo calculadas com a equação (25), com dados horários de irradiação solar conforme Figuras 15 e 16. Esse comportamento é ilustrado na **Figura 31**.

Figura 31 - Geração do sistema fotovoltaico e carga, em diferentes configurações de sistema fotovoltaico.



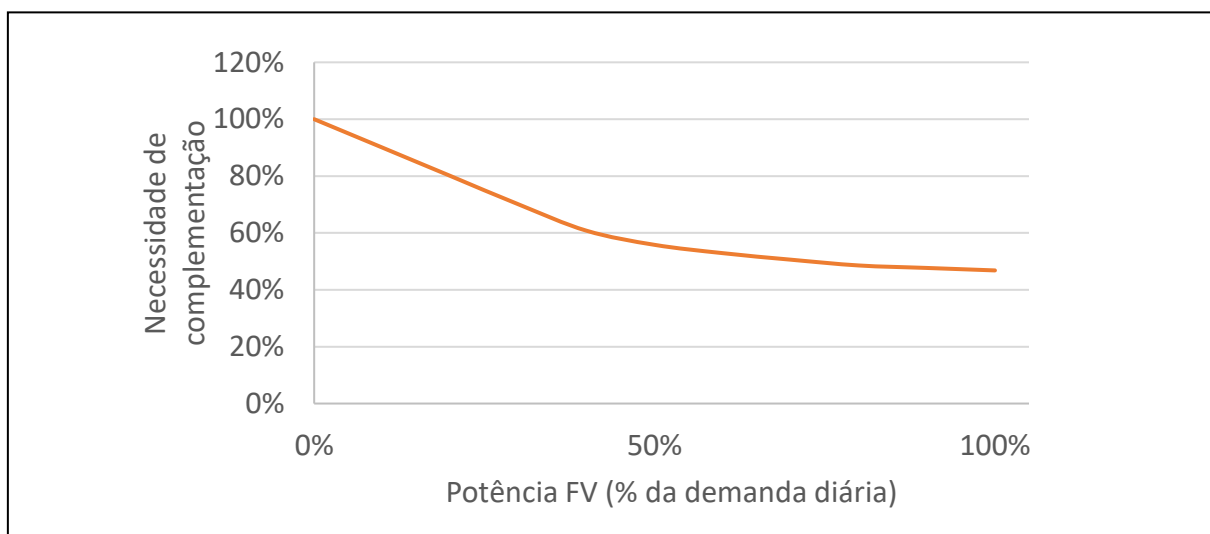
Com as curvas mostradas na **Figura 31**, percebe-se que em diversos momentos do dia, a potência $P_{fv,i}$ não alcança a potência da carga (P_l). Nesses momentos, uma complementação energética deve ser realizada, por meio de uma fonte externa, podendo ser a rede elétrica, um sistema de armazenamento ou, no caso do presente trabalho, um sistema complementar de geração elétrica com uso *syngas* e/ou biogás proveniente de RSU.

Estes diferentes dimensionamentos de plantas fotovoltaicas foram calculados, obtendo-se alguns parâmetros importantes para as demais análises deste estudo. Tais parâmetros são mostrados na **Tabela 16**.

Tabela 16 - Parâmetros dimensionais de sistemas fotovoltaicos.

$P_{g,fv}$ (kW)	(% de $P_{g,fv}$)	$E_{g,fv}$	Quantidade de painéis	Área ocupada (m ²)
395,4	100%	1.493	746	4.480
355,8	90%	1.344	671	4.032
316,3	80%	1.195	597	3.584
276,8	70%	1.045	522	3.136
237,2	60%	896	448	2.688
197,7	50%	747	373	2.240
158,2	40%	597	298	1.792
118,6	30%	448	224	1.344
79,1	20%	299	149	896
39,5	10%	149	75	448
0,0	0%	0	0	0

A necessidade de complementação pode ser ainda evidenciada, calculando-se o total energético a ser disponibilizado diariamente para o correto fornecimento da carga considerada. Tal efeito é mostrado na **Figura 32**.

Figura 32 - Necessidade de complementação elétrica em função do dimensionamento da planta FV.

Nota-se que, com uma planta fotovoltaica dimensionada em 0% (ou seja, potência de 0 kW), a complementação é total, ou seja, toda a energia fornecida à carga deve ser proveniente de uma fonte externa. No entanto, mesmo com uma planta dimensionada para a geração de 100% da energia demandada pela carga, ainda é necessária uma complementação de 47%. Tal fato corrobora a oportunidade de se analisar a inserção de uma segunda fonte, termelétrica, à base de combustíveis derivados de RSU.

4.1.3 Geração de eletricidade com SHGE solar-biogás-syngas

Os sistemas fotovoltaico e termoeletrico foram analisados separadamente e, inicialmente, foi realizada uma análise com o sistema fotovoltaico, variando sua potência e analisando o efeito sobre o perfil diário de geração, sua interação com a carga, bem como necessidades de complementação energética devido à sua variabilidade.

Em seguida foi realizada a análise com a planta termoeletrica, de modo a se obter parâmetros de seu dimensionamento em função da escolha entre a utilização apenas de biogás, apenas *syngas*, ou uma configuração híbrida com o uso dos dois combustíveis.

4.1.3.1 Planta termoeletrica

Considerando a demanda elétrica da carga, a planta termelétrica foi pensada de modo garantir o fornecimento sob quaisquer circunstâncias de dimensionamento da planta fotovoltaica. Dessa forma, sua potência deveria ser de, no mínimo os 83,13 kW da carga do sistema de hidrogênio. Assim, foi escolhido um motor de 50 KW, para ser operado em par, com os combustíveis escolhidos para cada um de acordo com o cenário de análise adotado. Os parâmetros do motor-gerador M50 Cento Series, da fabricante britânica Shenton Group são mostrados na **Tabela 17**.

Tabela 17 - Parâmetros do motor M50 Cento Series, de 50 kW.

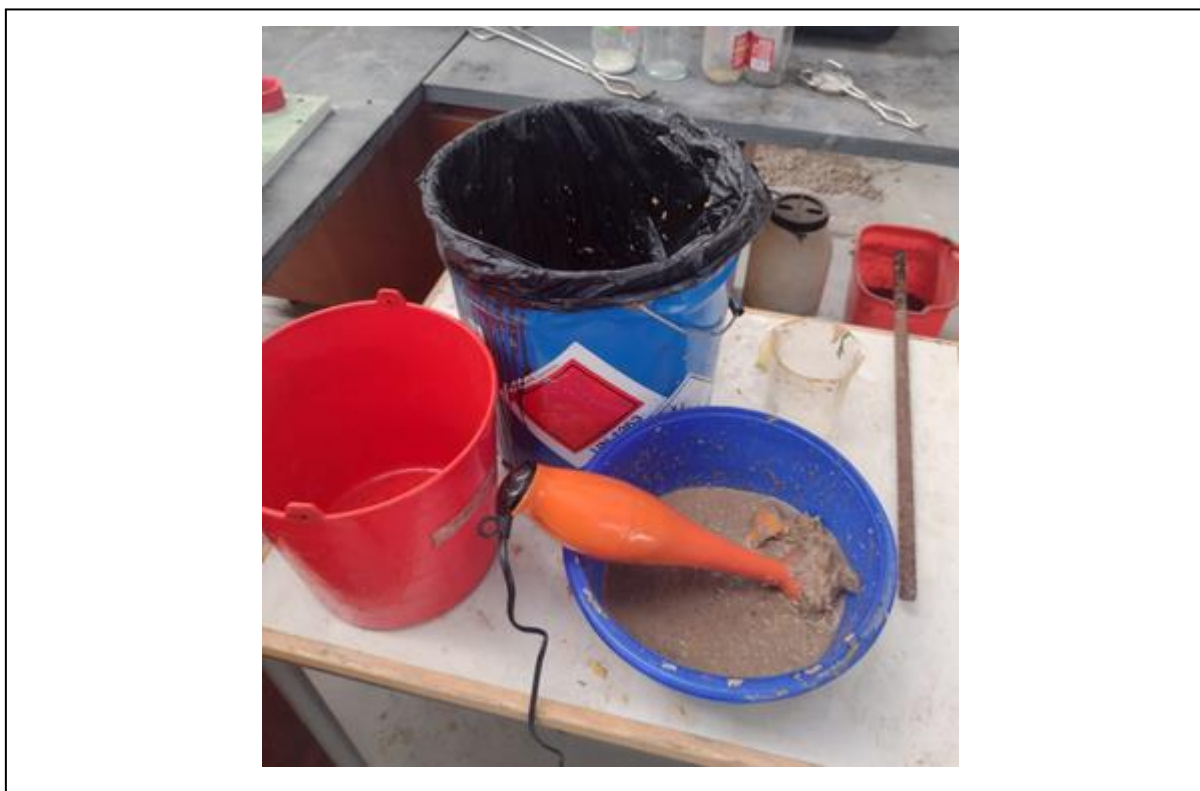
Parâmetro	Valor	Unidade
Potência nominal	50	kW
Tensão de saída	400	V
Combustível	Gás Natural	-
Fabricante do motor	MAN	-
Número de cilindros	4	-
Velocidade nominal	1500	rpm
Eficiência do gerador	92,8	%
Eficiência elétrica	27,2	%

Os potenciais de geração biogás e *syngas* são calculados com base no resultado das análises de produção dos mesmos.

4.1.3.2 Digestão anaeróbia da FORSU

Nas instalações da BioBIP do Instituto Politécnico de Portalegre (Portugal), foi realizada uma caracterização de uma FORSU composta por restos alimentares de restaurante universitário. Sendo os resíduos alimentares a maior parte da FORSU domiciliar coletada, optou-se por considerar como representativa a amostra para cálculos de produção de biogás a partir da digestão anaeróbia da FORSU. A etapa de processamento desse resíduo é mostrada na **Figura 33**.

Figura 33 - Preparação de amostra de FORSU para caracterização.



Fonte: Arquivo pessoal.

Para homogeneização da amostra, a mesma foi triturada com um liquidificador manual, sendo então separada em cadinhos para a realização da análise proximal, juntamente com outras amostras, para fins comparativos. Os resultados, com as amostras analisadas, calculados com as equações (9) e (10) são mostrados na **Tabela 18**.

Tabela 18 - Análise aproximada da FORSU e outros resíduos de comparação.

	Cadinho 1 (g)	Cadinho 2a (g)	Cadinho 2b (g)	Cadinho 3 (g)
Resíduo	Lodo	Res. Alimentar	Res. Alimentar	Madeira
M1	32,88	30,67	32,63	32,27
M2	35,14	36,55	37,44	34,27
M3	32,95	31,6	33,42	34,13
M4	32,91	30,71	32,66	32,29
ST(%)	3,10	15,82	16,42	93,00
SV(%)	57,14	95,70	96,20	98,92

Com os dados das massas dos cadinhos antes e após passagem por mufla, mostrada na Figura 17, os sólidos voláteis (SV) relativos às amostras de resíduos alimentares foram calculadas entre 15,8 e 16,4%.

Uma análise última foi realizada, por meio de uma análise elementar CHNS-O. tal análise foi realizada pelo Laboratório de Análises do Departamento de Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa. Determinou-se, assim, uma composição de C (51,04%), H (7,38%), N (2,92%), S (0,17%) e O (38,49%), por diferença.

Com isso, e pelas equações (11) e (12), calculou-se uma previsão de composição volumétrica de biogás de 53,0% de CH₄, 42,2% de CO₂, 4,7% de NH₃ e 0,12% de H₂S. Comparada com a bibliografia consultada, esta composição é discrepante em relação ao conteúdo de NH₃, não sendo possível encontrar valores semelhantes em quaisquer composições de biogás. Entre as hipóteses estão o pequeno tamanho da amostra, que pode ter tornado a análise com pouca representatividade para o tipo de resíduo, além da impossibilidade material de realização de duplicata.

Dessa forma, para os cálculos envolvendo biogás, adotou-se uma composição hipotética que mantivesse a mesma proporção entre CH₄ e CO₂, porém com valores de NH₃ e H₂S segundo Vitázek et al. (2016), mostrado na Tabela 3. Assim, o biogás a ser considerado terá composição de acordo com **Tabela 19**.

Tabela 19 - Composição adotada de biogás.

Componente	CH₄	CO₂	NH₃	H₂S
%(vol)	55,8	44,2	0,05	0,50

Com isto, pode-se calcular a o PCI e densidade deste combustível, de modo a embasar a análise técnica de sua combustão. Para o cálculo do PCI dos do biogás, são utilizados os PCI's individuais de cada componente, conforme **Tabela 20**.

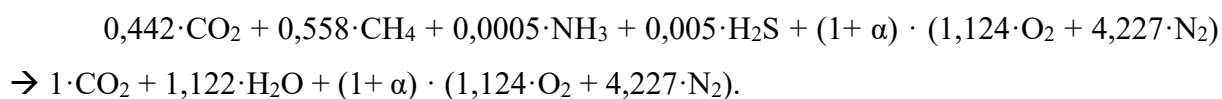
Tabela 20 - Propriedades de gases presentes no *syngas*.

Componente	PCI (MJ/kg)	Massa molar (g/mol)
H ₂	120,0	2,0
CO	11,1	28
CO ₂	0,0	44
CH ₄	50,0	16
N ₂	-	28
NH ₃	18,8	17
H ₂ S	15,2	34

Fonte: Elaboração própria, com dados de Paulino (2021) e Manzolini et al. (2019).

Dessa maneira, chegou-se a um PCI de 15,64 MJ/kg, com uma densidade de 1,27 m³/kg.

Dessa forma, pode ser determinada a reação de combustão do biogás, considerando um excesso de ar α :



4.1.3.3 Gaseificação de RSU

Considerando o estudo feito por Saravanakumar et al. (2022), conforme Tabela 13, resolveu-se adotar estes valores a fim de se analisar o aproveitamento energético dos RSU por meio da gaseificação, utilizando resíduo triturado após triagem. Os valores obtidos neste estudo possibilitam o cálculo das vazões de *syngas* para uma dada massa de resíduo, bem como o potencial energético, por meio da composição do *syngas* obtido.

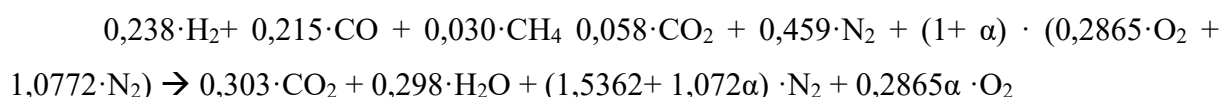
Dessa forma, com um gaseificador do tipo downdraft, tem-se uma taxa de produção de 1,93 m³/kg_{RSU} com resíduo composto por papel/cartão (45%), plástico (33%), borracha/têxtil (12,7%) e madeira (9,3%). O *syngas* obtido tem composição conforme Tabela 21.

Tabela 21 - Composição do *syngas* obtido na gaseificação de RSU.

Componente	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	N ₂	O ₂
%(Vol.)	23,80	21,50	3,0	5,80	45,9	0,00

Fonte: Saravanakumar et al. (2022).

Para o cálculo do PCI dos *syngas*, são utilizados os PCIs individuais de cada componente, conforme Tabela 20. Neste caso tem-se um *syngas* com PCI de 6,62 MJ/kg e densidade de 0,99 kg/m³. Com este valor, pode-se determinar a reação de combustão do *syngas*:



4.1.4 Combustão de *Syngas* e Biogás em MCI

As respectivas reações de combustão foram estabelecidas considerando suas composições bem como a atmosfera, conforme **Tabela 4** e **Tabela 13**, respectivamente. Dessa forma, com o uso do *software* Gaseq foram obtidas as composições molares dos gases de exaustão. Por meio de cálculos em planilhas, determinou-se as taxas dos gases de exaustão em relação à massa do combustível (kg/kg), conforme mostrados na **Tabela 22**.

Tabela 22 - Composição dos gases de exaustão na combustão de biogás e *syngas*.

Componente	g/mol	Biogás			<i>Syngas</i>		
		mols	g	kg/kg(comb)	mols	g	kg/kg(comb)
N ₂	28	5,9100	165,48	5,7952	0,9528	26,67	1,192014
H ₂ O	18	1,1197	20,15	0,7058	0,2884	5,19	0,231917
CO ₂	44	0,9994	43,97	1,5400	0,2883	12,68	0,566829
CO	28	0,0006	0,02	0,0006	0,0147	0,41	0,018379
O ₂	32	0,4379	14,01	0,4907	0,1120	3,58	0,160057
OH	17	0,0037	0,06	0,0022	0,0134	0,23	0,010141
H	1	0,0000	0,00	0,0000	0,0007	0,00	3,2E-05
O	16	0,0002	0,00	0,0001	0,0024	0,04	0,00173
H ₂	2	0,0002	0,00	0,0000	0,0026	0,005	0,000234
NO _x	72	0,0152	0,40	0,0138	0,0139	0,42	0,018606
SO ₂	64	0,0050	0,32	0,0112	-	-	-

As temperaturas de chama da combustão do biogás e do *syngas* foram calculadas em 1757,7 e 2321 K, respectivamente.

4.1.5 Planta termelétrica completa

Com os valores do PCI do biogás e do *syngas*, foram calculados os fatores de correção de eficiência de geração em MCI, conforme equações (22) e (23), dessa forma, foram alcançados os valores mostrados na **Tabela 23**.

Tabela 23 - Parâmetros de eficiência de MCI com combustão de *syngas* e biogás.

	MCI operando com biogás	MCI operando com <i>syngas</i>
PCI	15,64	6,62
γ_{Comb}	0,94	0,92
η_{el}	23,7%	23,1%
η_{MCI}^*	27,2%	27,2%

Assim, foram calculadas, considerando geração com potência de 50 kW em cada motor, os fluxos de *syngas* e biogás necessários a tal operação. Igualmente, foram calculados os requisitos mínimos para gaseificadores e reatores anaeróbios, de modo a fornecerem suprimento suficiente de *syngas* ou biogás. Os cenários analisados correspondem a B – MCI (2 x 50 kW) operando com biogás, S'B' – (dois MCI de 50 kW, operando separadamente com *syngas* ou biogás) e S – MCI (2 x 50 kW) operando com *syngas*. Os resultados são mostrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 24 - Fluxos e dimensionamento de sistemas em três cenários de geração termelétrica, com *syngas* e/ou biogás.

Observação	Parâmetro	Cenário			Equação
		B	S'B'	S	
Dimensionamento do banco de MCI	P_{syn} (kW)	-	50	100	-
	P_{bio} (kW)	100	50	-	-
kg/s	$m_{c,s}$ (kg/s)	-	0,033	0,066	(19)
	$m_{c,b}$ (kg/s)	0,027	0,013	-	-
kg/dia	$m_{c,s}$ (kg/dia)	-	2.268	4.535	-
	$m_{c,b}$ (kg/dia)	1.862	931	-	(19)
Dimensionamento do gaseificador	$P_{c,s}$ (kW)	-	216,4	432,8	(19)
	m_{cs} (kg/h)	0,0	76,9	153,9	(14)
Volume do digestor anaeróbico (m ³)	V_r digest (m ³)	144,8	72,4	0,0	(14)
	V_g (m ³)	72,4	40,0	7,5	(14)
	V_t (m ³)	217,3	112,4	7,5	-
Demanda de RSU por cenário	$m_{r,s}$ (kg/dia)	-	889	1.777	-
	$m_{r,o}$ (kg/dia)	17.190	8.595	-	-
	$m_{r,tot}$ (kg/dia)	17.190	9.484	1.777	-

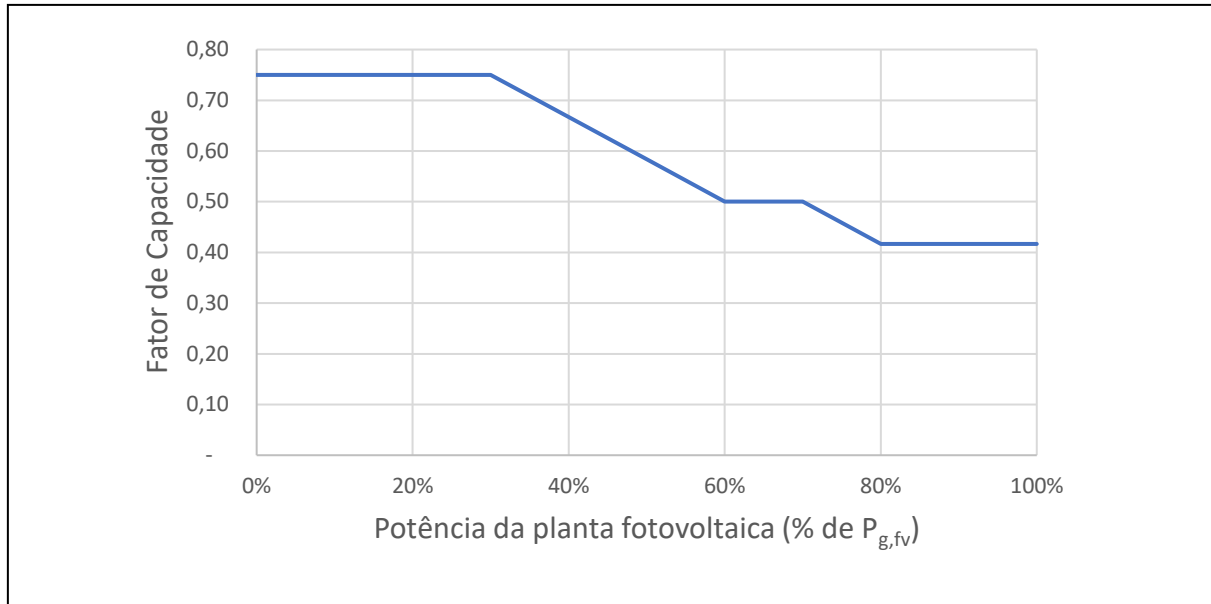
Tem-se, com os dados da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, que uma geração contínua de 100 kW por 19,2 h diárias (FC = 0,80), apenas com biogás, são consumidos 17.190 kg de FORSU. Para uma geração equivalente, com os mesmos parâmetros, são consumidos 1.777 kg de RSU. Isso equivale dizer que a geração com biogás resulta em uma taxa de 112 kWh por tonelada de resíduo utilizado, enquanto que a geração com *syngas* resulta em 1.080 kWh/t.

Considerando os 57,6 kWh necessários para a produção de 1 kg de hidrogênio, conforme calculado anteriormente, essas quantidades de energia e RSU se traduzem em 1,94 e 18,75 kg de hidrogênios produzidos a partir de 1 tonelada de resíduo, processados com digestão anaeróbia ou gaseificação, respectivamente.

Uma vez dimensionada a parcela termelétrica do sistema híbrido em questão, a mesma pode funcionar conjuntamente com a planta fotovoltaica de modo a suprir de maneira consistente a sua demanda. Variando-se a potência de pico da planta fotovoltaica, a necessidade de geração complementar da planta termelétrica é afetada, fazendo com que seu fator de

capacidade (proporcional às horas por dia em funcionamento) se altere. Foram feitas análises considerando essas possibilidades, e o resultado é mostrado na **Figura 34**.

Figura 34 - Relação entre a potência da planta fotovoltaica e o fator de capacidade solicitado à planta termoeétrica.



O que se pode verificar é que, quanto menor a potência de pico da planta fotovoltaica, a planta termoeétrica deve funcionar por maior período de tempo, chegando a um fator de capacidade de 75% quando a planta fotovoltaica é inexistente. Ainda assim, com a planta fotovoltaica com 100% de sua potência necessária, a termoeétrica de 100 kW é solicitada a operar com fator de capacidade de 42%.

Variar o tempo de operação de uma planta implica em aumentar ou diminuir o consumo de combustíveis, ao mesmo tempo em que se aumenta ou diminui a geração de energia elétrica. Por outro lado, a ociosidade de geração de uma planta acarretará aproveitamento abaixo de seu potencial, impactando nos custos da energia gerada, conforme é verificado na análise econômica.

4.1.6 Produção de biogás no aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP

Para o cálculo das estimativas de produção de biogás no aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP, inicialmente foi realizado um levantamento dos fluxos de recebimento de RSU no aterro, bem como sua composição gravimétrica, conforme apresentado no capítulo de Introdução da presente tese. Em seguida, foram calculados os fatores de decaimento (k_0) e potencial de produção de metano (L_0) do aterro sanitário, de acordo com os parâmetros dados

por (AMINI; REINHART; MACKIE, 2012). Tais fatores foram aplicados aos modelos LandGEM e CETESB, considerando uma janela de 30 anos para deposição de RSU, seguida de uma fase em que o aterro é fechado para recebimento de novos resíduos.

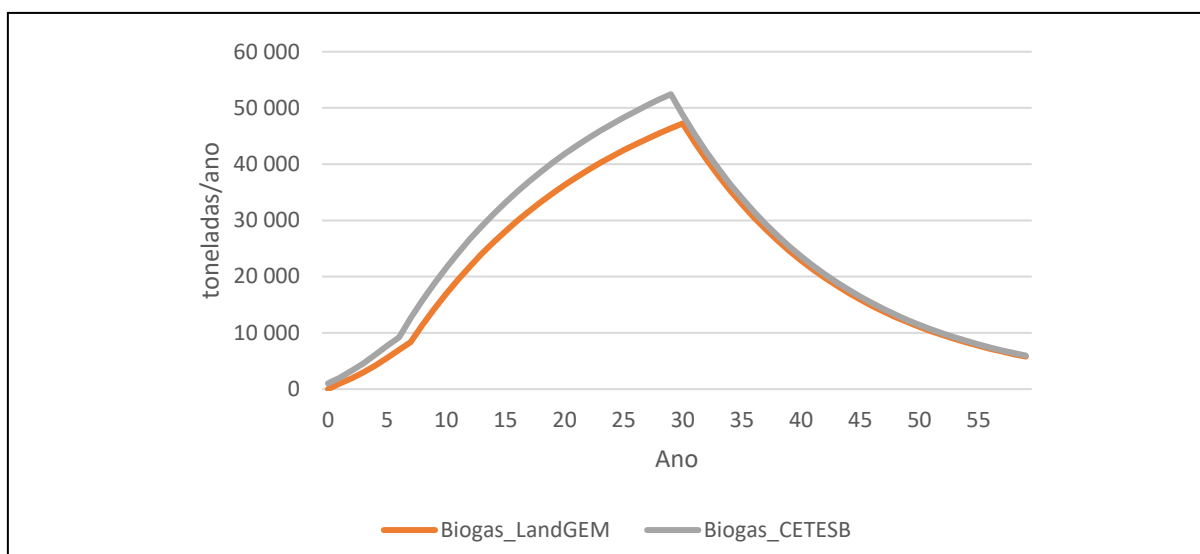
4.1.6.1 Produção de biogás – Modelos LandGEM e CETESB

O cálculo das vazões de metano, com os modelos LandGEM e CETESB, foi realizado com as constantes de decaimento (k_0) e de potencial de produção de metano (L_0). Conforme Tabela 6, os RSU orgânicos de biodegradação lenta representam 8,9% do total, enquanto os de biodegradação moderadamente rápida representam 9,0%. Os RSU orgânicos de biodegradação rápida representam 72,6% do total. Aplicando a cada uma dessas parcelas fatores iguais a 0,02, 0,04 e 0,09, respectivamente, chegou-se a uma constante k_0 igual a 0,0725.

A constante de capacidade de produção de metano foi calculada aplicando de forma ponderada os valores de L_0 individuais a cada fração orgânica da Tabela 9, resultando em um valor igual a 201,1 m³_{CH4}/t.

Com os dados de produção de RSU entre os anos de 2006 (abertura do aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP) e 2021 e considerando uma vida útil de 30 anos (fechamento em 2035), foi realizada uma projeção sobre a produção futura de RSU, entre os anos de 2022 e 2025. Essa projeção considerou um crescimento anual de 5,32%, verificado nos últimos 9 anos, onde houve uma estabilização do crescimento dos fluxos anuais de deposição de RSU nesse aterro.

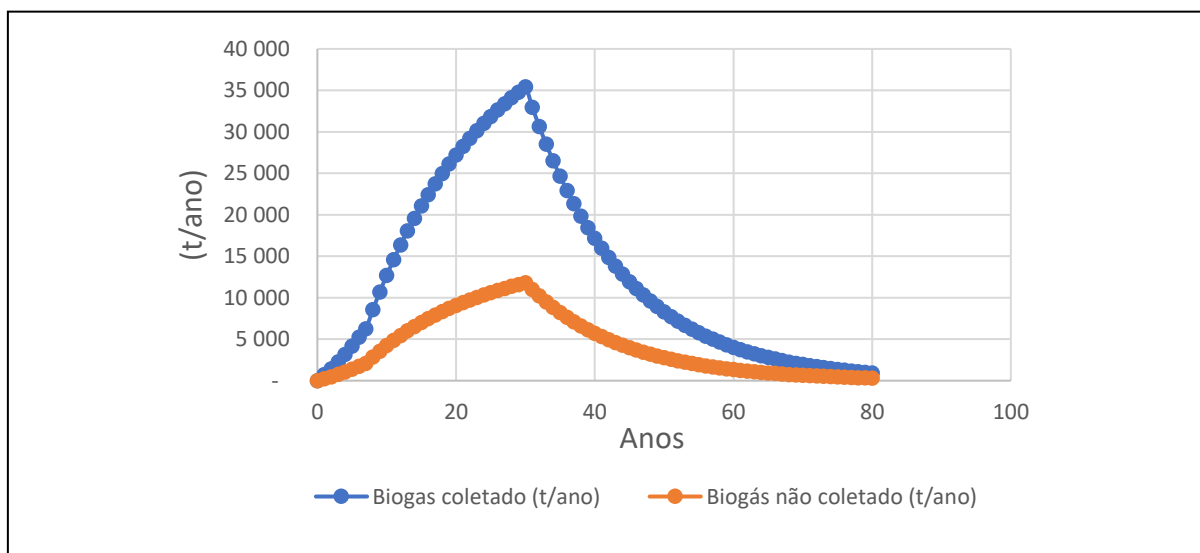
Assim, tendo em mãos os valores de K_0 e L_0 , assim como uma série anual de fluxos de deposição, esses valores foram inseridos nos modelos LandGEM, equação (5) e CETESB, equação (6), resultando em vazões anuais de biogás, tanto para a fase operativa de 30 anos considerada para o aterro quanto para o período pós encerramento. Esse resultado é mostrado na **Figura 35**.

Figura 35 - Produção de biogás - Modelos LandGEM e CETESB.

Esses resultados mostram uma grande proximidade entre os valores calculados pelos dois modelos.

As maiores diferenças foram verificadas no período operativo do aterro, tendo o modelo LandGEM uma previsão em média 20% menor durante o período operativo, sendo essa diferença decrescente ao longo do tempo. Após o fechamento, essa diferença se estabilizou em 3%.

Quanto ao biogás efetivamente coletado e a porção perdida para a atmosfera, devido às perdas fugitivas, foram calculadas as vazões, conforme equações (7) e (8), considerando uma eficiência de coleta de 75%. Os resultados são mostrados na **Figura 36**.

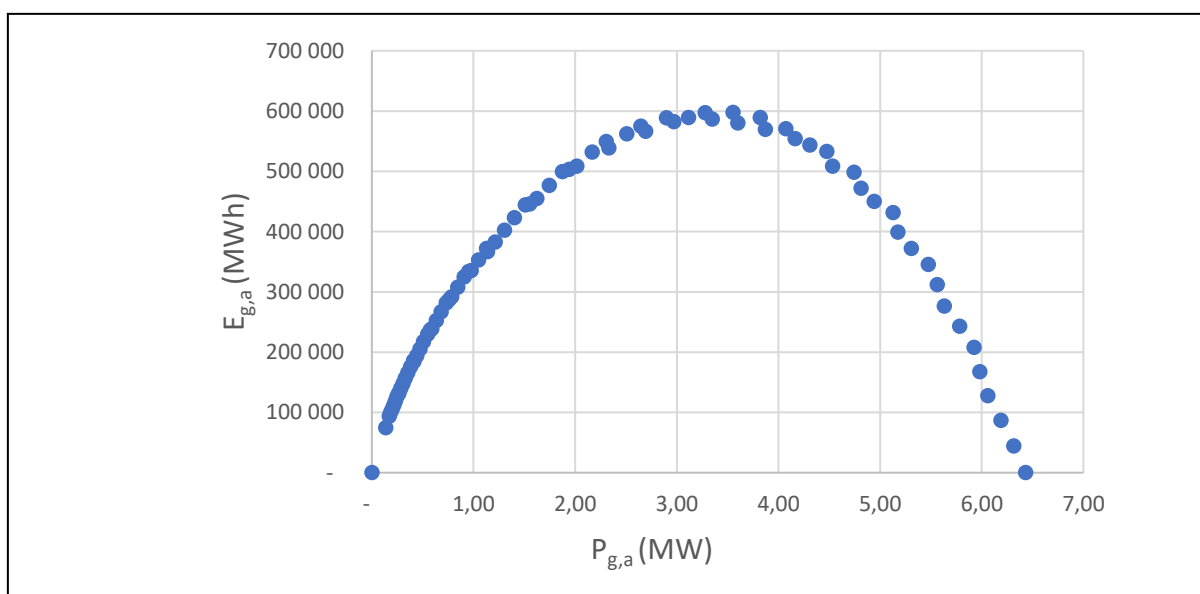
Figura 36 - Biogás coletado e não coletado.

Nota-se, portanto, que uma quantidade significativa de biogás, contendo gases de efeito estufa, é perdida para a atmosfera, causando impactos ao meio ambiente. Até o ano 30 de operação do aterro, quando se prevê o seu encerramento, 184.958 toneladas de biogás terão sido emitidas à atmosfera, sendo aproximadamente metade deste valor composto por metano, se considerada a composição apontada na Tabela 25.

4.1.7 Potencial de geração de eletricidade no aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP

Com as vazões de biogás produzido de acordo com o modelo LandGEM e considerando uma vida útil de 15 anos para os MCI e um FC de 80%, foram calculadas as projeções de geração anual de energia elétrica por meio de conjuntos moto-geradores, com a equação (24), relacionando-os com as respectivas potências, com equação (25). Os resultados são então mostrados na Figura 37.

Figura 37 - Geração de energia elétrica em função da potência disponível



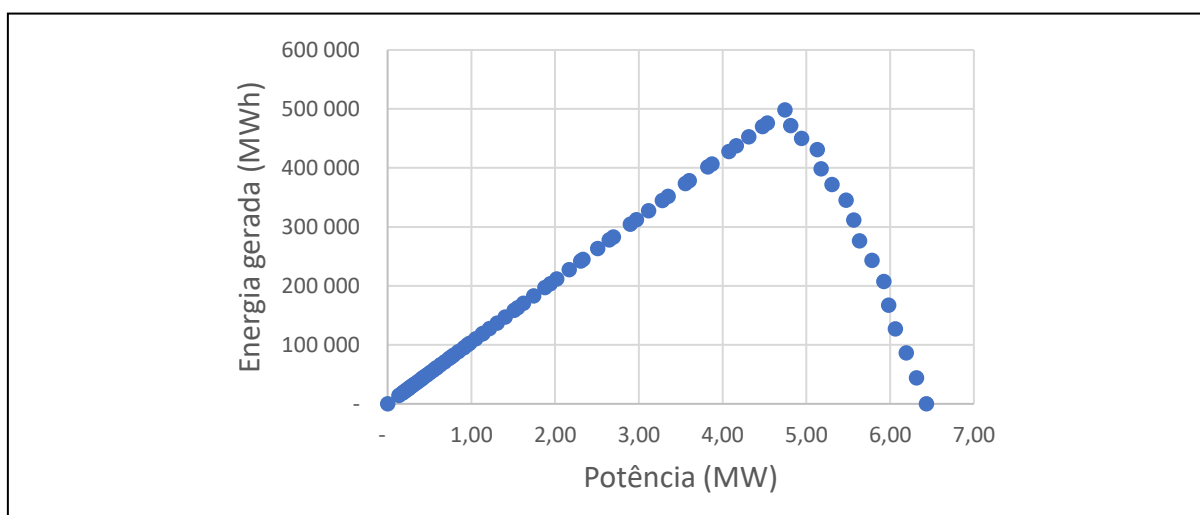
Assim, considerando todas as potências possíveis para os fluxos de biogás produzido em cada ano, foi obtido um leque de potências entre 0 e 6,43 MW. Cada potência de geração $P_{g,a}$ (MW) foi associada a uma produção máxima de energia possível $E_{g,a}$ (MWh) durante o tempo em que a vazão de biogás fosse maior ou igual ao necessário para manter tal potência. Assim, pode ser observada uma geração máxima de energia (597.714 MWh) relacionada à potência de 3,55 MW.

4.1.7.1 Potencial elétrico – Vida útil limitada a 15 anos

Uma vez que as vazões de biogás não são constantes durante a vida útil dos grupos moto-geradores, atingindo um pico e então um decaimento após o encerramento da vida útil do aterro, as potências de geração calculadas não necessariamente se mantêm disponíveis durante toda a vida útil dos MCI.

Assim, em certos casos a energia gerada se limita a um período menor da vida útil da planta, atingindo um aproveitamento máximo na potência de 4,74 MW, conforme mostrado na **Figura 38**.

Figura 38 - Geração de energia elétrica em função da potência - vida útil limitada a 15 anos



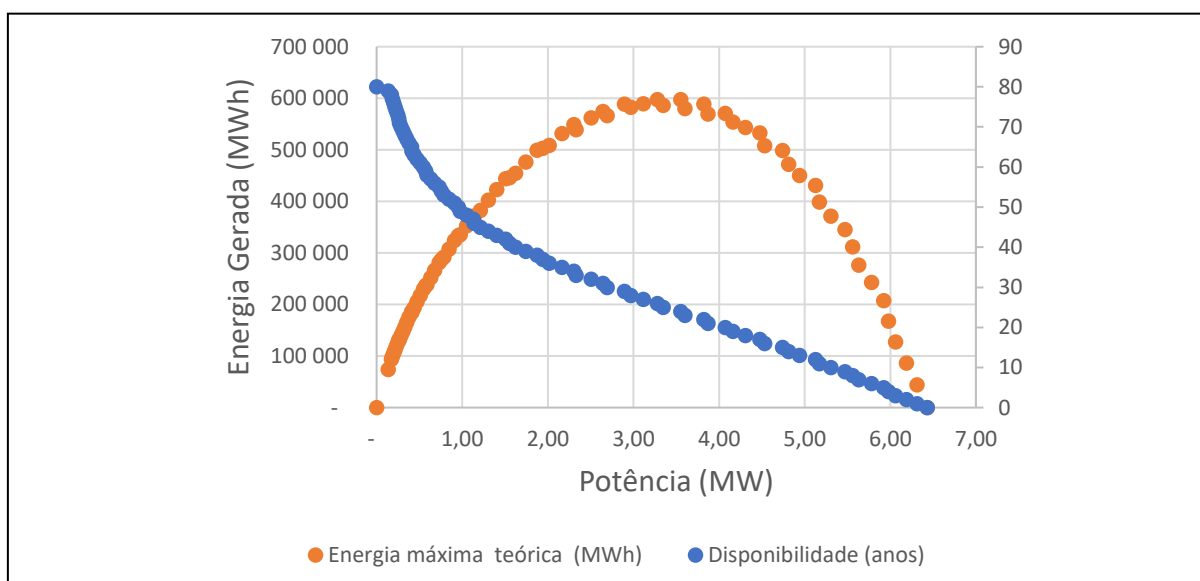
Diferentemente do observado na Figura 37, aqui tem-se um leque geração máxima de energia, relacionadas a potências, mas agora considerando que a planta geradora poderá funcionar por no máximo 15 anos. Ao fazer isso, limita-se a geração total, no entanto adiciona-se uma maior fidelidade à análise uma vez que, por mais que as vazões de biogás possam sustentar uma potência elétrica por um certo tempo, a vida útil dos equipamentos pode não alcançar este período. Neste caso, seriam necessários novos investimentos de capital para geração, o que não foi considerado nesta análise em virtude de possíveis mudanças tecnológicas a longo prazo. Optou-se por analisar como um investimento único. Assim, a potência que entrega a máxima geração foi calculada em 4,74 MWh.

4.1.7.2 Geração máxima x vida útil disponível

Relacionando as potências calculadas com os respectivos fluxos anuais de produção de biogás e o intervalo de tempo (anos) em que este fluxo é disponível, a cada potência é dada uma vida útil máxima teórica, conforme mostrado na Figura 18.

Considerando uma vida útil máxima de 15 anos do MCI, esta vida útil máxima está relacionada a uma potência de 4,74 MW, o que pode ser confirmado na **Figura 39**.

Figura 39 - Vida útil disponível em função da potência de geração



Pode ser notado que potências de geração se disponibilizam em função da vazão de biogás produzida no aterro sanitário, que varia para cada ano. No entanto, cada potência está disponível por um período limitado de tempo. Isso ocorre uma vez que vazões menores, e consequentemente potências menores, podem ser garantidas por mais tempo que as maiores. Assim, a potência máxima, calculada em 4,74 MW está associada a uma vida útil de 15 anos.

Períodos

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE AMBIENTAL

A análise ambiental envolve a determinação da eficiência ecológica da planta termoelétrica, da planta solar e, consequentemente, da planta geradora como um todo. São apresentados nessa sessão os resultados dessa análise.

4.2.1 Eficiência ecológica

A eficiência ecológica é afetada pela eficiência de geração de uma planta, bem como pelo nível de emissões de gases poluentes. Dessa forma, são apresentados os resultados dos cálculos dos índices de poluição da planta termoelétrica, considerando a combustão do biogás e do *syngas*, bem como com diferentes combinações de geração utilizando estes combustíveis. A eficiência ecológica da planta fotovoltaica é afetada por sua eficiência energética e seu fator de emissão. Assim, são mostrados os resultados relativos à planta solar fotovoltaica, tomada isoladamente, bem como na forma de uma planta híbrida termoelétrica-solar fotovoltaica.

4.2.1.1 Indicadores de poluição da combustão do biogás e *syngas*

Inicialmente, calculam-se os indicadores de poluição (Π_g), com base nas emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ oriundos da combustão do biogás e do *syngas*, por meio da equação (33).

No caso do biogás e do *syngas*, com os dados da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e com a equação (32), tem-se os totais de $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ por cada quilograma de combustível queimado. Dessa forma, considerando os PCI dos respectivos combustíveis, os indicadores de poluição são calculados e mostrados na Tabela 25.

Tabela 25 - Indicadores de poluição do biogás e *syngas*.

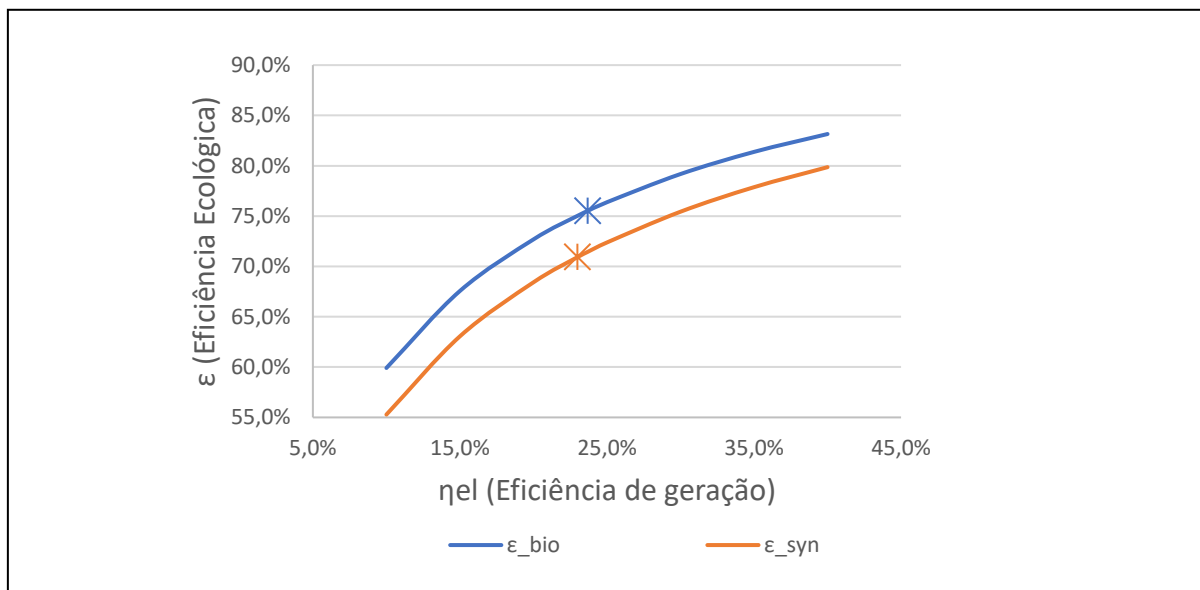
Parâmetro	Unidade	Biogás	<i>Syngas</i>
PCI	MJ/kg	15,64	6,62
Emissões	$\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{kg}_{\text{comb}}$	2,795	1,500
Π_g	$\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{PCI}$	0,179	0,227

Verifica-se que, apesar de o biogás estar relacionado com uma maior emissão de poluente por cada unidade de massa de combustível queimado, seu indicador de poluição ainda é menor, considerando que seu PCI é significativamente superior ao do *syngas*.

4.2.1.2 Eficiência ecológica da geração de energia elétrica com biogás e *syngas*

Uma vez tendo os indicadores de poluição do biogás e *syngas*, foram calculadas as eficiências ecológicas relativas à geração de eletricidade com estes combustíveis em MCI. Com as eficiências de geração calculadas com cada combustível, de acordo com as equações (22) e (23), e mostradas na Tabela 23, foram calculadas as eficiências ecológicas para ambos os casos, e mostradas na Figura 40.

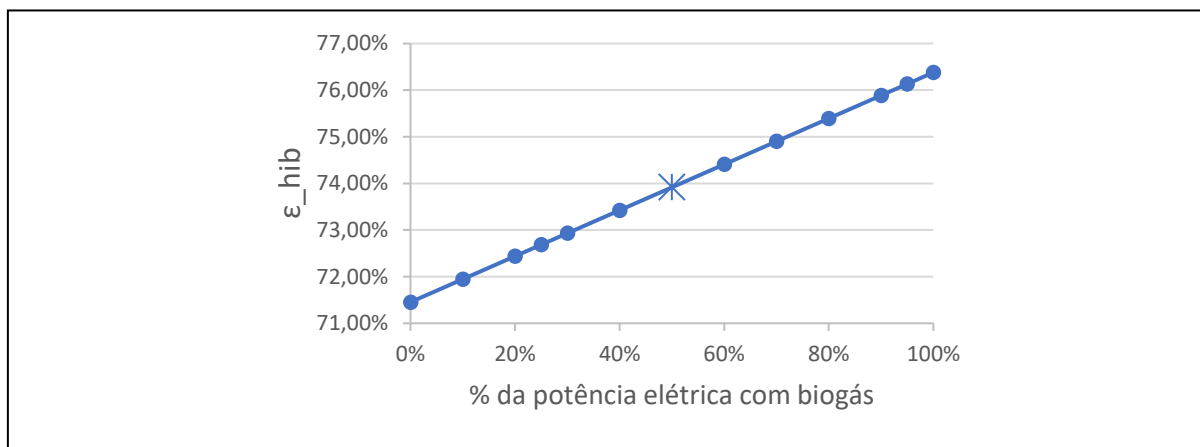
Figura 40 - Eficiência ecológica da geração de energia com biogás e *syngas* em função da eficiência de geração.



Observa-se que ao longo de todo o alcance de eficiências de geração, o biogás apresenta maior eficiência ecológica do que a geração com *syngas*. Em destaque, os pontos considerando a eficiência declarada do MCI de 50 kW. Nesse caso, o uso de combustíveis diferentes de gás natural provoca a diminuição da eficiência dos motores e, dessa forma, com 23,0% de eficiência de geração, o MCI operando com *syngas* possui ϵ igual a 70,9%, enquanto que o MCI operando com biogás opera com eficiência de 23,7%, e sua eficiência ecológica é de 75,5%.

Operando cada grupo gerador com um combustível diferente permite uma hibridização dos resultados da eficiência ecológica. Nesse caso, foram calculadas as eficiências agregadas variando cada geração entre 0 e 100%, fixando-se a eficiência ecológica de cada uma nos valores mostrados anteriormente. O resultado é mostrado na **Figura 41**.

Figura 41 - Eficiência ecológica com a diferentes proporções de geração com biogás e *syngas*.

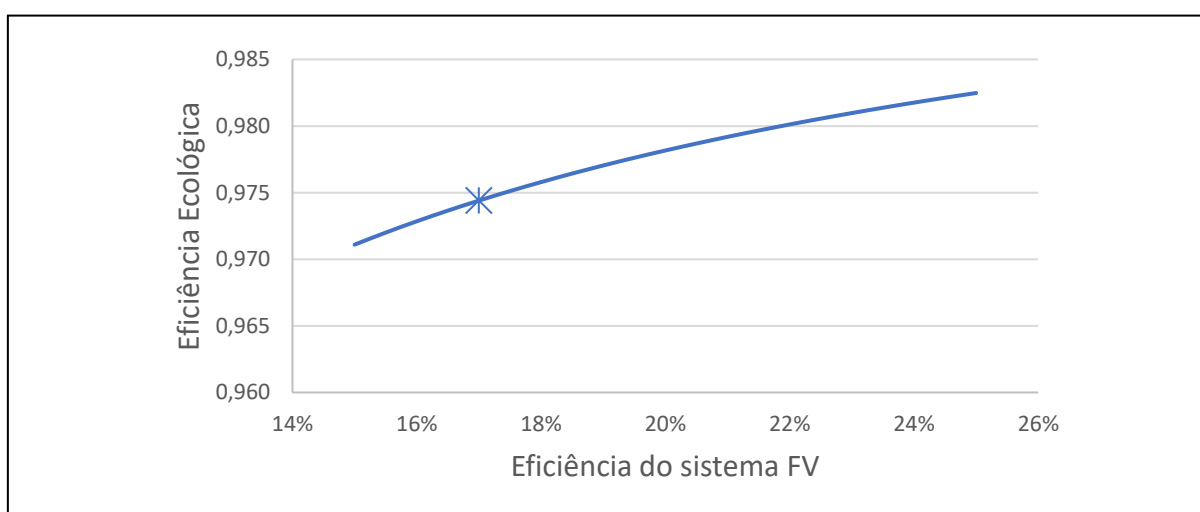


Neste caso, a eficiência ecológica oscila entre os valores individuais de cada geração, com seus respectivos combustíveis. O ponto central (S'B'), com cada motor de 50 kW operando independentemente seu próprio combustível, indica uma eficiência ecológica média de 73,92%.

4.2.1.3 Eficiência ecológica da planta solar fotovoltaica

Considerando a eficiência de 17,0% da planta solar fotovoltaica (painéis e perdas no inversor) e um fator de emissão de ciclo de vida de 33 gCO₂eq/kWh (AGENCY, 2018), foi calculada a eficiência ecológica da planta fotovoltaica isoladamente, variando sua eficiência ao longo de uma faixa, o resultado é mostrado na **Figura 42**.

Figura 42 - Eficiência ecológica de uma planta fotovoltaica tomada isoladamente.

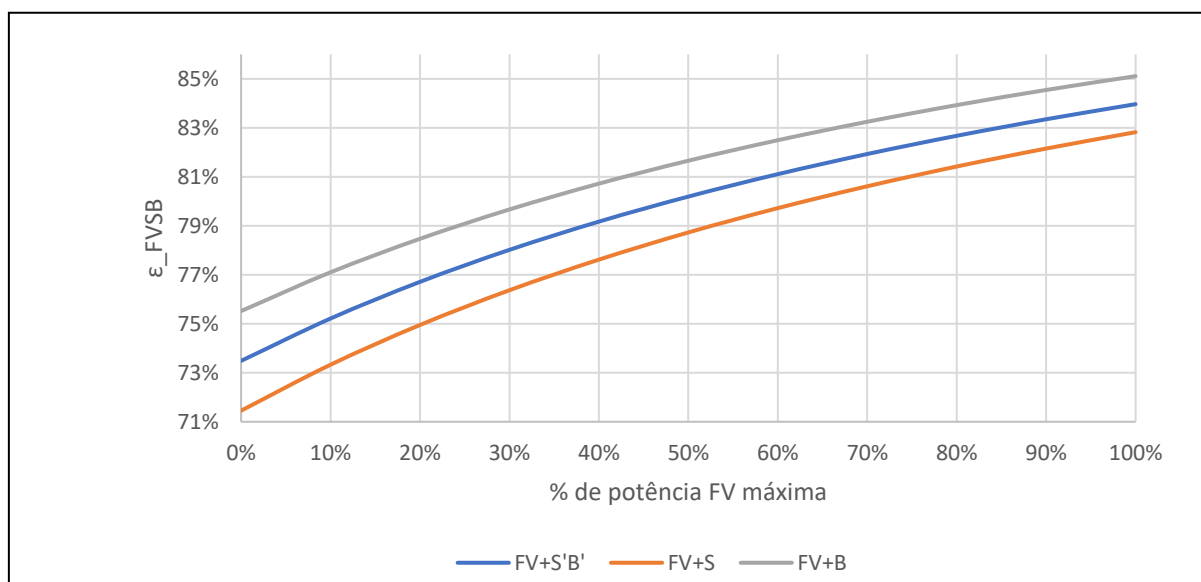


Em todos os casos, a eficiência ecológica da planta fotovoltaica é superior a 97%, o que é relacionado ao fato de não emitir diretamente emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ na atmosfera, muito embora sua eficiência técnica seja inferior a outras tecnologias.

4.2.1.4 Eficiência ecológica do SHGE completo – Solar e Termoelétrico

Finalmente é calculada a eficiência ecológica do sistema completo, composto por planta fotovoltaica e termoelétrica (MCI) de 100 kW. Os resultados incluem cenários de fotovoltaica com biogás (FV+B), com planta termoelétrica mista (FV+S'B') e fotovoltaica com termoelétrica a *syngas* (FV+S). A potência de pico do sistema fotovoltaico foi variada entre 0 e 100%, mantendo-se as configurações termoelétricas. O resultado é mostrado na **Figura 43**.

Figura 43 - Eficiência ecológica de SHGE completo - Solar e Termoelétrico.



Variando-se positivamente a potência de pico do sistema fotovoltaico, ocorrem o aumento da eficiência ecológica, como era esperado. Em todos os casos, a eficiência ecológica com termoelétrica a biogás é superior, entre 76,5% (isoladamente) e 85,1%, quando em conjunto com planta fotovoltaica com 100% da potência estabelecida.

4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA

Uma análise econômica foi realizada buscando-se determinar os custos nivelados de geração de energia elétrica (LCOE) sob diferentes cenários, conforme os custos de investimento e operacionais mostrados na Tabela 15 e parâmetros de dimensionamento técnico de acordo com Tabela 24.

4.3.1 Custos de geração da energia elétrica

Inicialmente, calculou-se o LCOE para a planta termoelétrica isoladamente. Variou-se a participação de geração com *syngas* e biogás, fixando-se a potência do conjunto em de 100 kW. Os custos foram calculados considerando dois cenários econômicos para os custos operacionais:

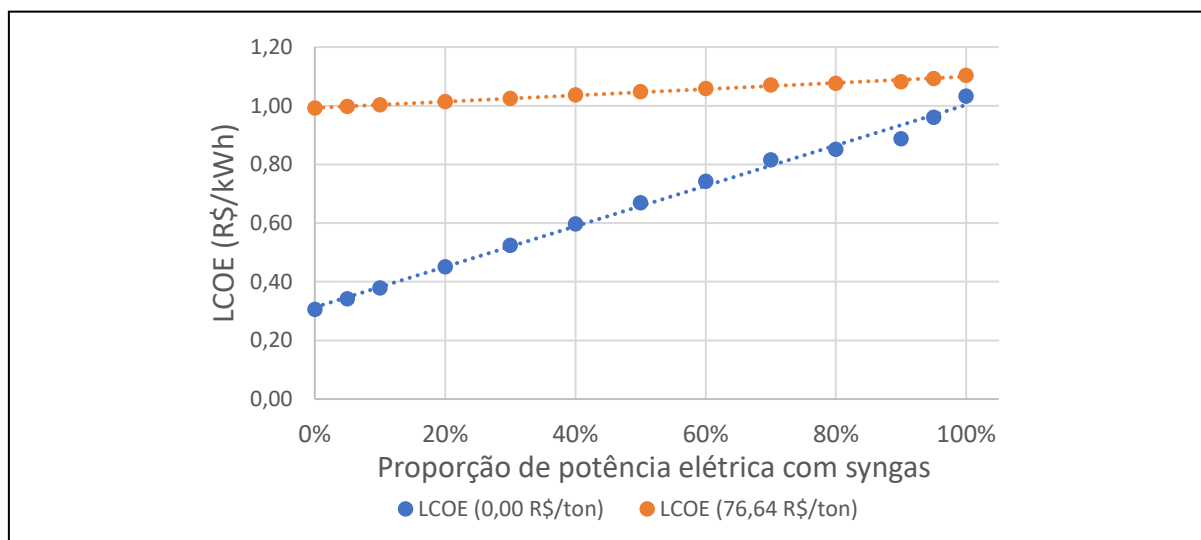
Cenário a) Custo de tratamento de RSU, estimado em 76,64 R\$/ton, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2023), e conforme a Tabela 24.

Sendo o custo de separação e tratamento dos RSU potencialmente abarcados pelo município, em que recai a obrigação de destinação dos mesmos, os custos de geração termoelétrica foram calculados conforme um segundo cenário:

Cenário b) Custo de geração de energia desconsiderando o custo adicional com tratamento.

Para ambos os casos, os resultados são mostrados na **Figura 44**.

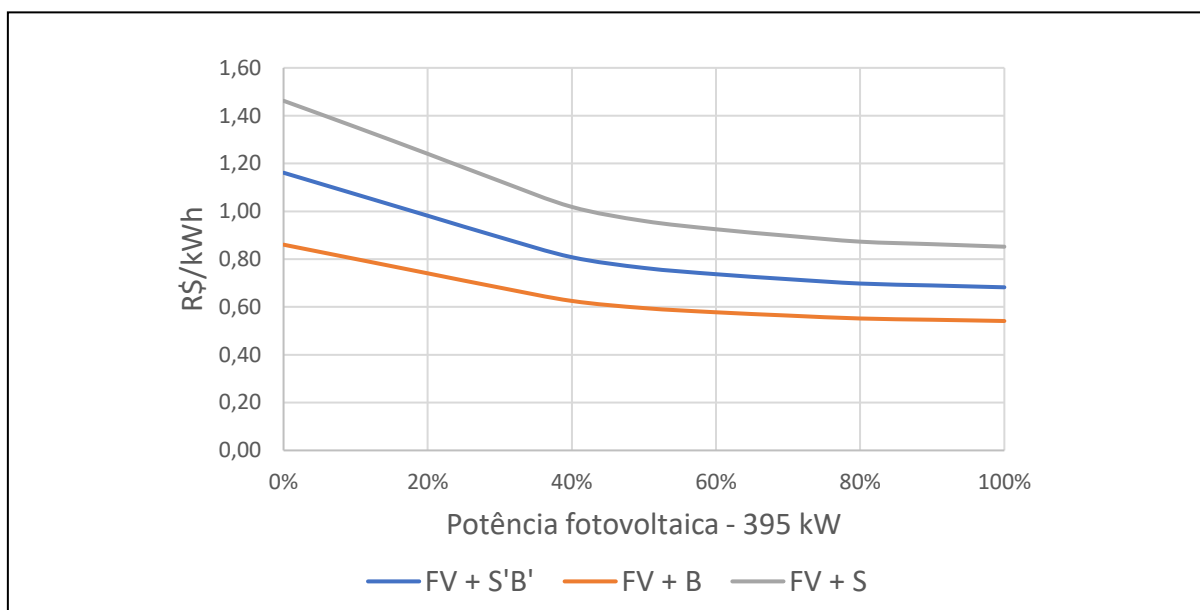
Figura 44 - Custo nivelado de geração elétrica com *syngas* e biogás - Potência fixa de 100 kW.



Tais resultados apontam para menores custos de geração de eletricidade com a utilização do biogás e, neste caso, o valor é de 0,31 R\$/kWh, sem considerar o custo com tratamento de RSU e 0,99 R\$/kWh, considerando o tratamento. No caso de uma planta termoelétrica suprida igualmente por 50 kW de *syngas* e de biogás, os custos são 0,67 e 1,05 R\$/kW, respectivamente. A geração apenas com *syngas* acarreta custos entre 1,03 e 1,10 R\$/kWh.

Ainda considerando os cenários econômicos mencionados, foram calculados os custos de com os três cenários técnicos (FV+B, FV+S'B' e FV+S) adotados. Os resultados referentes ao cenário econômico a) são mostrados na Figura 45.

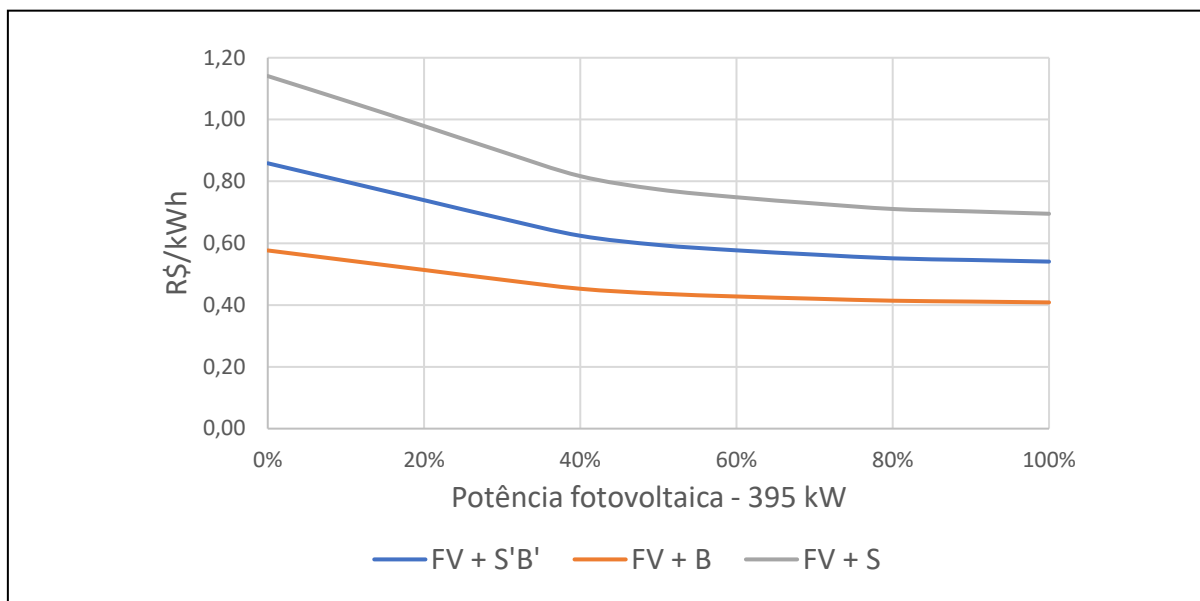
Figura 45 - Custo de geração com planta completa, variando a potência de pico fotovoltaica, cenário econômico a).



Nota-se que persistem os custos mais elevados de geração utilizando *syngas* em todos os cenários e para todas as potências de pico fotovoltaicas. Os menores custos são obtidos com a planta 100% dimensionada (395,4 kW), sendo que o cenário técnico FV + B apresenta um custo de geração de 0,54 R\$/kWh, o cenário FV+B apresenta 0,68 R\$/kWh, enquanto que FV+S implica em um custo de 0,85 R\$/kWh.

De igual maneira, foram calculados os custos de geração para o cenário econômico b), e os resultados são mostrados na Figura 46.

Figura 46 - Custo de geração com planta completa, variando a potência de pico fotovoltaica, cenário econômico b).

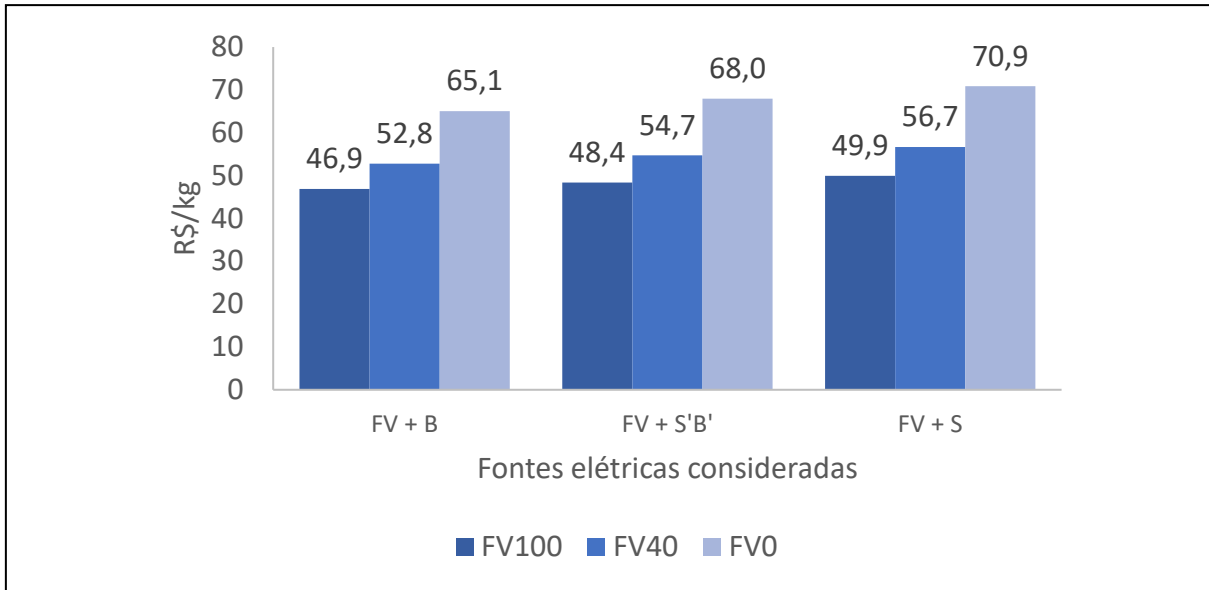


Os custos de geração neste no cenário b) são significativamente menores, conforme mostrado na Figura 46. Os menores custos também foram obtidos com adoção de planta fotovoltaica 100% dimensionada. Os menores valores encontrados para os cenários FV+B, FV+S e FV+S'B' correspondem a 0,41, 0,54 e 0,70 R\$/kWh, respectivamente.

4.3.2 Custos de produção do hidrogênio

Por sua vez, o custo nivelado de produção de hidrogênio é impactado pelo custo das energias geradas pela planta termoeletrica, uma vez que a energia gerada por ela tem grande participação no total gerado pela planta completa. Aplicando-se os custos de aquisição de materiais e custos operacionais específicos da produção de hidrogênio. Considerando os cenários a) e b) adotados para o cálculo dos custos de geração elétrica, chega-se aos seguintes resultados de custos de produção, inicialmente apresentados para o cenário a), na Figura 47.

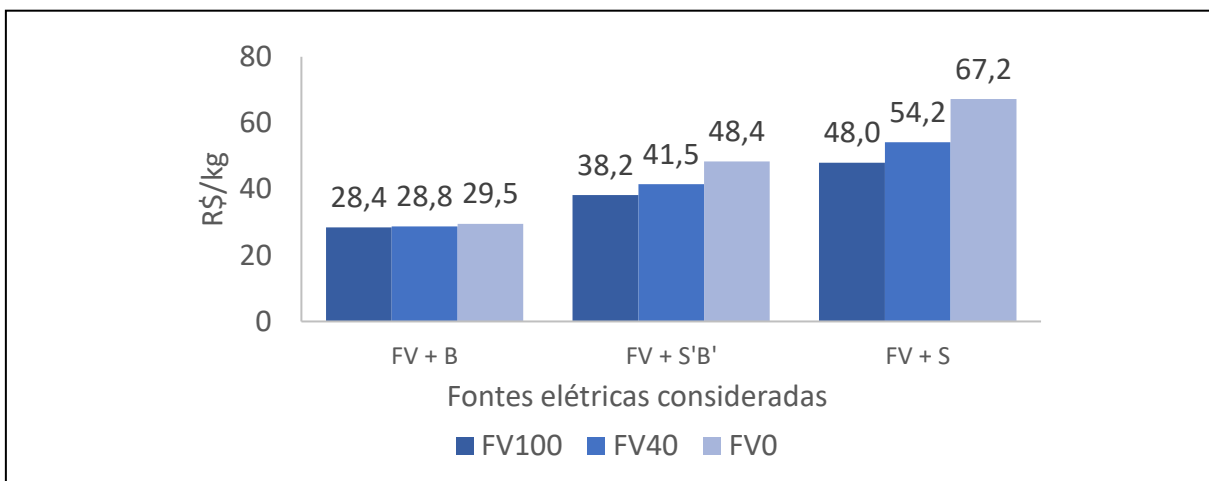
Figura 47 - Custo nivelado de produção de hidrogênio com diferentes cenários de geração fotovoltaica e termoeétrica, cenário a).



Assim, os menores custos se mostram persistentemente menores para tanto mais se utiliza biogás na geração termoeétrica e maior for o dimensionamento da planta fotovoltaica. Sob todos os cenários analisados, o menor custo de produção de hidrogênio (46,9 R\$/kg) foi obtido com energia solar fotovoltaica complementada com energia gerada com biogás derivado de FORSU.

Para o cenário b), desconsiderando os custos com tratamento de RSU, os custos foram calculados e são mostrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 48 - Custo nivelado de produção de hidrogênio com diferentes cenários de geração fotovoltaica e termoeétrica, cenário b).



Dessa forma, os custos de produção de hidrogênio foram calculados conforme os custos com eletricidade de acordo com o cenário b). Nesse caso, de acordo com a Figura 48, os menores custos foram encontrados para o cenário técnico FV+B com usina solar fotovoltaica 100% dimensionada, no valor de 28,4 R\$/kg. O Maior valor corresponde ao cenário técnico FV+S, com ausência de geração fotovoltaica, sendo um custo de 67,2 R\$/kg.

5 CONCLUSÕES

Foram analisados sob diversos cenários a produção de hidrogênio por eletrólise alimentada com energia solar fotovoltaica, de forma a atender a uma demanda de hidrogênio gerada pela substituição de veículos de coleta de RSU a diesel por equivalentes movidos a hidrogênio. Embora a geração elétrica com energia solar fotovoltaica seja capaz de fornecer, no período de um dia, energia elétrica suficiente para o processo de produção e compressão do hidrogênio, a variabilidade inerente a essa fonte torna imprescindível um sistema auxiliar de complementação, no caso, uma geração termoelétrica.

Foi verificado que para uma planta fotovoltaica com potência nominal acima de 40% da necessária para a geração diária da carga a necessidade de complementação se estabiliza. Ou seja, por maior que seja a planta fotovoltaica, ainda assim, uma parte considerável da energia terá de ser fornecida por outros meios para atender apropriadamente uma carga com funcionamento linear. Tal fato corrobora o benefício da utilização de plantas híbridas de geração. Analisar essa dinâmica está de acordo com o primeiro objetivo específico proposto para este trabalho.

No que diz respeito à escolha tecnológica dentro do atual paradigma de gerenciamento RSU na região atendida pelo aterro sanitário de Cachoeira Paulista - SP, o aproveitamento máximo da energia disponível nas vazões de biogás se dá na potência de 4,74 MW. No entanto, uma desvantagem associada aos aterros é a emissão de biogás para a atmosfera devido a perdas por fugas. Até o término estimado das operações do aterro, no 30º ano, estima-se que 184.958 toneladas de biogás terão sido liberadas na atmosfera, sendo aproximadamente metade desse volume composto por metano, um gás de alto potencial de aquecimento global.

A geração de energia elétrica a partir do biogás é uma tecnologia com alto grau de amadurecimento, sendo amplamente disponível para implementação em diferentes escalas. No caso de aplicação para tratamento de RSU, necessita de uma etapa anterior de triagem e separação de frações recicláveis e inorgânicas. A gaseificação de RSU encontra-se em um estágio menos avançado e com equipamentos em grau menor de disponibilidade em mercado em relação à biodigestão anaeróbia.

Ambas as tecnologias podem ser aplicadas para o tratamento com aproveitamento energético dos RSU, cada uma com suas especificidades. No caso da gaseificação, como se

tratam de resíduos como papel e plástico, é necessário o cuidado de que não concorra com a reciclagem e reuso destes materiais, prioritárias na gestão de RSU.

Com relação às quantidades de RSU tratado para uma mesma quantidade de energia gerada, a biodigestão anaeróbia é a tecnologia que utiliza mais massa de RSU para uma mesma geração, sendo consumidos 17190 kg para uma geração contínua diária de 100 kW, com fator de capacidade de 0,8, enquanto que, nas mesmas condições, a geração com gaseificação consome 1777 kg.

Em termos de potencial do RSU para geração de energia, os resultados indicam uma taxa de geração de 112 kWh/t_{RSU} com digestão anaeróbia e 1.080 kWh/t_{RSU} a gaseificação. Para a produção de hidrogênio, considerando os 57,6 kWh necessários para a produção de 1 kg, essas quantidades de energia e RSU se traduzem em 1,94 e 18,75 kgH₂/t_{RSU}, com RSU processados com digestão anaeróbia ou gaseificação, respectivamente. A determinação das relações entre potenciais de geração de energia e quantidades de RSU processados se enquadram no objetivo de nº 3 deste trabalho.

Apesar de o biogás estar associado a uma maior emissão de poluentes por unidade de massa de combustível queimado, segundo os cálculos realizados, seu índice de poluição ainda é inferior ao do *syngas*, considerando seu Poder Calorífico Inferior (PCI) significativamente maior.

A eficiência ecológica da termoeletrica a biogás demonstrou uma eficiência ecológica superior, variando entre 76,5% (isoladamente) e 85,1%, quando integrada a uma planta fotovoltaica com 100% da capacidade calculada para o atendimento da carga de produção de hidrogênio com eletrólise. Tendo realizada estas análises, considera-se atendido o objetivo nº 4 deste trabalho.

A realização da análise econômica constituiu o objetivo específico de nº 5 do presente trabalho. Neste caso, os custos mais baixos de geração de energia nos cenários considerados (FV+B, FV+S e FV+S'B') são de 0,41, 0,54 e 0,70 R\$/kWh, respectivamente.

O custo de produção do hidrogênio é influenciado pelo custo da energia elétrica utilizada. Nesse contexto, os custos mais baixos foram identificados no cenário técnico FV+B, com uma usina solar fotovoltaica 100% dimensionada, no valor de 28,4 R\$/kg. O valor mais

elevado corresponde ao cenário técnico FV+S, sem geração fotovoltaica, resultando em um custo de 67,2 R\$/kg.

Apesar das vantagens, do ponto de vista ambiental e econômico, a geração de eletricidade com biogás derivado de FORSU apresenta como desafios a segregação das frações putrescíveis dos resíduos domésticos que, via de regra, são coletados misturados às demais frações, inclusive as recicláveis. A adoção de coleta seletiva bem como estações de triagem de resíduos pode acarretar, no final dos processos, uma FORSU mais facilmente utilizável na digestão anaeróbia.

A geração de energia elétrica com *syngas*, por sua vez, apesar de apresentar custos mais altos, ainda pode encontrar lugar quando da utilização de resíduos plásticos mais difíceis de serem reciclados que, de outra forma, seriam descartados em aterros ou, pior ainda, no meio ambiente, provocando diversos efeitos danosos à biosfera e à saúde pública conhecidos do descarte inapropriado de plástico.

Conclui-se também que a utilização de plantas termoelétricas pode ser um fator benéfico quando utilizado juntamente com fontes renováveis variáveis, como a solar fotovoltaica. Neste caso, pode haver uma interessante complementação das gerações, culminando em uma resultante mais facilmente controlável, de acordo com o comportamento das cargas.

Foi possível também mostrar que a produção de hidrogênio pode ser beneficiada com a utilização de plantas híbridas, complementando a geração com energia solar fotovoltaica com a geração termoelétrica com aproveitamento de RSU.

Destaca-se, por fim, a possibilidade de que os RSU sejam encarados não apenas como um passivo socioambiental, mas como uma oportunidade de incrementar a geração elétrica, desviando os RSU de deposições em aterro sanitário, onde seu aproveitamento se torna muito desvantajoso.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- Utilização de métodos de otimização para o dimensionamento de plantas híbridas solar-termoelétricas com aproveitamento energético de RSU.
- Análise de Ciclo de Vida (ACV) visando a determinação de fatores de emissão ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$) com geração de energia a partir de RSU por meio da digestão anaeróbia da FORSU e gaseificação de frações inorgânicas.
- Estudo da utilização de misturas *syngas*/biogás derivados de RSU em MCI para geração elétrica.
- Cálculo de potenciais de produção de hidrogênio derivado de RSU a partir de outras rotas, como a reforma a vapor do biogás e do *syngas*.
- Análise da aplicação de células a combustível para a conversão energética do biogás e *syngas* derivados de RSU.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022** Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2022/>>.

ACHINAS, S.; EUVERINK, G. J. W. Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. **Resource-Efficient Technologies**, v. 2, n. 3, p. 143–147, 1 set. 2016.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. **Landfill Gas Primer - An Overview for Environmental Health Professionals**. Disponível em: <<https://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch2.html>>. Acesso em: 3 ago. 2023.

AGENCY, I. E. **Statistics | World - Total CO2 emissions (chart)**. Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Emissions&indicator=TotCO2&mode=chart&dataTable=INDICATORS>>. Acesso em: 8 maio. 2019.

AGUIAR, M. C. P. **Análise dos critérios do meio físico aplicados na definição de áreas para aterros sanitários nos processos de licenciamento ambiental: realidade e perspectivas**. [s.l.] UNESP - São Paulo State University, 2019.

AL SEADI, T.; BAXTER, D. **AD of the organic fraction of MSW**. Paris: [s.n.].

ALAO, M. A.; POPOOLA, O. M.; AYODELE, T. R. Waste-to-energy nexus: An overview of technologies and implementation for sustainable development. **Cleaner Energy Systems**, v. 3, p. 100034, 1 dez. 2022.

AMINI, H. R.; REINHART, D. R.; MACKIE, K. R. Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties. **Waste Management**, v. 32, n. 2, p. 305–316, 1 fev. 2012.

ANEEL. **SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL**.

ARCOS, J. M. M.; SANTOS, D. M. F. The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. **Gases 2023, Vol. 3, Pages 25-46**, v. 3, n. 1, p. 25–46, 3 fev. 2023a.

ARCOS, J. M. M.; SANTOS, D. M. F. The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. **Gases 2023, Vol. 3, Pages 25-46**, v. 3, n. 1, p. 25–46, 3 fev. 2023b.

ASANTE, K.; GYAMFI, S.; AMO-BOATENG, M. Techno-economic analysis of waste-to-energy with solar hybrid: A case study from Kumasi, Ghana. **Solar Compass**, v. 6, p. 100041, 1 jun. 2023.

ATTEYA, A. I.; ALI, D.; HOSSAIN, M. Developing an Effective Capacity Sizing and Energy Management Model for Integrated Hybrid Photovoltaic-Hydrogen Energy Systems Within Grid-Connected Buildings. **IET Conference Proceedings**, v. 2022, n. 11, p. 204–212, 2022.

AYODELE, T. R.; MUNDA, J. L. Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 33, p. 17669–17687, 5 jul. 2019.

AYODELE, T. R.; OGUNJUYIGBE, A. S. O.; ALAO, M. A. Life cycle assessment of waste-to-energy (WtE) technologies for electricity generation using municipal solid waste in Nigeria. **Applied Energy**, v. 201, p. 200–218, 2017.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do Cidadão - Correção de valores**. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores>>. Acesso em: 2 jan. 2023.

BARONI, M. The Integration of Non-dispatchable Renewables. Em: HAFNER, M.; LUCIANI, G. (Eds.). **The Palgrave Handbook of International Energy Economics**. 1. ed. Cham: [s.n.]. p. 269–299.

BASU, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Em: ACADEMIC PRESS (Ed.). 1. ed. Cambridge: [s.n.].

BOLINGER, M.; BOLINGER, G. Land Requirements for Utility-Scale PV: An Empirical Update on Power and Energy Density. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 12, n. 2, p. 589–594, 2022.

BOLOY, R. A. M. et al. Ecological impacts from syngas burning in internal combustion engine: Technical and economic aspects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 5194–5201, 1 dez. 2011a.

BOLOY, R. A. M. et al. Ecological impacts from syngas burning in internal combustion engine: Technical and economic aspects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 5194–5201, 1 dez. 2011b.

BOVE, R.; LUNGHI, P. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 11–12, p. 1391–1401, 1 jul. 2006.

BRAGA, L. B. et al. Comparative analysis between a PEM fuel cell and an internal combustion engine driving an electricity generator: Technical, economical and ecological aspects. **Applied Thermal Engineering**, v. 63, n. 1, p. 354–361, 5 fev. 2014.

BRASIL. **LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010**. Brasil, 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>

BURTON, N. A. et al. Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110255, 1 jan. 2021.

BUSWELL, A. M.; MUELLER, H. F. **Mechanism of Methane Fermentation**. Industrial & Engineering Chemistry. **Anais...**1952.

CALIFORNIA DEPARTMENT OF RESOURCES RECYCLING AND RECOVERY. **Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste**. Davis: [s.n.].

CANDIAN SOLAR. **Datasheet - HiKu6 Mono PERC**. , 2021.

CANDIANI, G. **Emissões fugitivas de gás metano em aterro sanitário**. [s.l: s.n.].

CAPONI, R. et al. Single-tank storage versus multi-tank cascade system in hydrogen refueling stations for fuel cell buses. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 64, p. 27633–27645, 29 jul. 2022.

CARDOSO, J. et al. Comparative 2D and 3D analysis on the hydrodynamics behaviour during biomass gasification in a pilot-scale fluidized bed reactor. **Renewable Energy**, v. 131, p. 713–729, 1 fev. 2019.

CÂRDU, M.; BAICA, M. Regarding a new variant methodology to estimate globally the ecologic impact of thermopower plants. **Energy Conversion and Management**, v. 40, n. 14, p. 1569–1575, 1 set. 1999.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA - CENBIO. **Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/cenbio_geracao_energia_eletrica_partir_biogas.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2024.

CETESB. **Biogás**. , 2006.

CETESB. **SÚMULA DO PARECER TÉCNICO Nº 18192/10/TA**. Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/consema/2011/11/oficio_consema_2010_023/Sumula_do_Parecer_Tecnico_CETESB-18192-10-TA.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2024.

CETESB. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 7 ago. 2023.

CHACARTEGUI, R. et al. SPHERA project: Assessing the use of syngas fuels in gas turbines and combined cycles from a global perspective. **Fuel Processing Technology**, v. 103, p. 134–145, 1 nov. 2012.

COPA, J. R. et al. Techno-Economic Assessment of the Use of Syngas Generated from Biomass to Feed an Internal Combustion Engine. **Energies 2020, Vol. 13, Page 3097**, v. 13, n. 12, p. 3097, 15 jun. 2020.

CORONADO, C. R. et al. Determination of ecological efficiency in internal combustion engines: The use of biodiesel. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 10, p. 1887–1892, 1 jul. 2009.

CORONADO, C. R.; YOSHIOKA, J. T.; SILVEIRA, J. L. Electricity, hot water and cold water production from biomass. Energetic and economical analysis of the compact system of

cogeneration run with woodgas from a small downdraft gasifier. **Renewable Energy**, v. 36, n. 6, p. 1861–1868, 1 jun. 2011.

CRESESB. **SunData v 3.0**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

DE CAMPOS, V. A. F. et al. Internal Combustion Engine Fueled with Biogas: Energetic, Economic and Environmental Analyses. **IEEE Latin America Transactions**, v. 17, n. 11, p. 1873–1878, 1 nov. 2019.

DE MORAES, D. R. et al. Energy-ecological efficiency of the fuel cell electric vehicle powered by different biofuels. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 24, n. 5, p. 1389–1402, 1 jul. 2022.

DE PAULA SANTOS, C. F. et al. Ecological efficiency of renewable and non-renewable energy generation power systems considering life cycle assessment. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 44, n. 11, p. 1–13, 1 nov. 2022.

DE SOUZA RIBEIRO, N. et al. Electric energy generation from biogas derived from municipal solid waste using two systems: landfills and anaerobic digesters in the states of São Paulo and Minas Gerais, Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 48, p. 101552, 1 dez. 2021.

EDELMANN, W.; ENGELI, H. **More than 12 years of experience with commercial anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid wastes in Switzerland**. ADSW 2005 Conference Proceedings. Vol. 1. **Anais...**Copenhagen: 2005.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Caderno de preços de geração - 2021**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-%0Aabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-336/topico-437/Série O Papel da EPE - Vol 1.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-%0Aabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-336/topico-437/Série%20O%20Papel%20da%20EPE%20-%20Vol%201.pdf)>.

FÁBIO AUGUSTO GOMES VIEIRA REIS. **Curso de geologia ambiental via internet**. Disponível em: <<http://www1.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/residuos/res13.html>>. Acesso em: 3 ago. 2023.

FERRARA, A.; JAKUBEK, S.; HAMETNER, C. Cost-optimal design and energy management of fuel cell electric trucks. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 43, p. 16420–16434, 19 maio 2023.

FERRAZ DE CAMPOS, V. A. et al. A review of waste management in Brazil and Portugal: Waste-to-energy as pathway for sustainable development. **Renewable Energy**, v. 178, p. 802–820, 1 nov. 2021a.

FERRAZ DE CAMPOS, V. A. et al. A review of waste management in Brazil and Portugal: Waste-to-energy as pathway for sustainable development. **Renewable Energy**, v. 178, p. 802–820, 1 nov. 2021b.

GOMEZ, J. R.; BACA, J.; GARZON, F. Techno-economic analysis and life cycle assessment for electrochemical ammonia production using proton conducting membrane. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 1, p. 721–737, 1 jan. 2020.

GONÇALVES, C. D. C. **Modelação do processo de digestão anaeróbia da Forsu à escala industrial**. [s.l.] Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, 2012.

GRAY, N. et al. Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors. **Advances in Applied Energy**, v. 1, p. 100008, 23 fev. 2021.

GREENER CONSULTORIA LTDA. **Estudo Estratégico 1º semestre 2023: Geração Distribuída - Mercado Fotovoltaico**.

GROENEMANS, H. et al. Techno-economic analysis of offshore wind PEM water electrolysis for H₂ production. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 37, p. 100828, 1 set. 2022.

HOLM, T. et al. Hydrogen costs from water electrolysis at high temperature and pressure. **Energy Conversion and Management**, v. 237, p. 114106, 1 jun. 2021.

HOSSEINI, M.; DINCER, I.; ROSEN, M. A. Hybrid solar-fuel cell combined heat and power systems for residential applications: Energy and exergy analyses. **Journal of Power Sources**, v. 221, p. 372–380, 2013.

HUANG, Y.; TURAN, A. Fuel sensitivity and parametric optimization of SOFC – GT hybrid system operational characteristics. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 14, p. 100407, dez. 2019.

INCER-VALVERDE, J. et al. “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. **Energy Conversion and Management**, v. 291, p. 117294, 1 set. 2023.

INPE. **Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais**. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/infos/index.html>>. Acesso em: 7 ago. 2023.

ISLAM, M. R.; AL RAFI, J.; HOSSAIN, M. S. **Operation planning of renewable energy based hybrid system incorporating waste-to-energy (WtE) technologies**. 2019 International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0, STI 2019. **Anais...Dhaka**, Bangladesh: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. . Acesso em: 22 nov. 2023

KALYANI, K. A.; PANDEY, K. K. **w energy status in India: A short review**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, mar. 2014. . Acesso em: 12 nov. 2019

KHOUYA, A. Levelized costs of energy and hydrogen of wind farms and concentrated photovoltaic thermal systems. A case study in Morocco. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 56, p. 31632–31650, 13 nov. 2020.

KOTOWICZ, J. et al. Hydrogen generator characteristics for storage of renewably-generated energy. **Energy**, v. 118, p. 156–171, 1 jan. 2017.

KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. **A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste**. **Waste Management** Elsevier Ltd, , 1 nov. 2017. . Acesso em: 11 nov. 2019

KURIA, J.; MARINGA, M. Developing Simple Procedures for Selecting, Sizing, Scheduling of Materials and Costing of small bio-gas units. **International Journal for Service Learning in Engineering, Humanitarian Engineering and Social Entrepreneurship**, v. 3, n. 1, p. 9–40, 1 maio 2008.

LI, C. H. et al. Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology. **Renewable Energy**, v. 34, n. 3, p. 815–826, 2009.

LIMA, P. DE M. et al. Cost analysis of the strategic planning of the integrated urban solid waste system in Campo Grande, Mato Grosso do Sul. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 4, p. 749–759, 2022.

LIN, M.; HAUSSENER, S. Techno-economic modeling and optimization of solar-driven high-temperature electrolysis systems. 2017.

LIPTAY, K. et al. Use of stable isotopes to determine methane oxidation in landfill cover soils. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 103, n. D7, p. 8243–8250, 20 abr. 1998.

LLERENA-PIZARRO, O. R. et al. Electricity sector in the Galapagos Islands: Current status, renewable sources, and hybrid power generation system proposal. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 108, 2019.

LOPES, M. M. et al. Energy potential using landfill biogas and solar photovoltaic system: a case study in Brazil. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 21, n. 6, p. 1587–1601, 1 nov. 2019.

MAHMOUD, M. M.; IBRIK, I. H. Techno-economic feasibility of energy supply of remote villages in Palestine by PV-systems, diesel generators and electric grid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 10, n. 2, p. 128–138, 1 abr. 2006.

MAMBELI BARROS, R.; TIAGO FILHO, G. L.; DA SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 150–164, fev. 2014.

MANZOLINI, P. G. et al. **Deliverable 3.6: Preliminary assessment of the most promising industrial applications Task 3.6: Other industrial application of SEWGS.**

MÁRIO SENAGA; JOSÉ JORGE. **CETESB desenvolve programas de computador para divulgar tecnologia de produção e uso de biogás.** Disponível em: <https://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2006/06/28_software.htm>. Acesso em: 6 ago. 2023.

MARKVART, T.; CASTAÑER, L. **Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications**. New York: Elsevier Science Ltd., 2003.

MARTIN, J.; NEUMANN, A.; ØDEGÅRD, A. Renewable hydrogen and synthetic fuels versus fossil fuels for trucking, shipping and aviation: A holistic cost model. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 186, p. 113637, 1 out. 2023.

MAYER, F.; BHANDARI, R.; GÄTH, S. **Critical review on life cycle assessment of conventional and innovative waste-to-energy technologies**. *Science of the Total Environment* Elsevier B.V., 1 jul. 2019. . Acesso em: 11 nov. 2019

MAYYAS, A.; MANN, M. Manufacturing competitiveness analysis for hydrogen refueling stations. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 18, p. 9121–9142, 5 abr. 2019.

MAYYAS, A.; WEI, M.; LEVIS, G. Hydrogen as a long-term, large-scale energy storage solution when coupled with renewable energy sources or grids with dynamic electricity pricing schemes. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 33, p. 16311–16325, 24 jun. 2020.

MCINERNEY, M. J.; BRYANT, M. P. Basic Principles of Bioconversions in Anaerobic Digestion and Methanogenesis. Em: SPRINGER NEW YORK (Ed.). **Biomass Conversion Processes for Energy and Fuels**. 1. ed. New York: [s.n.]. p. 277–296.

MESSENGER, R. A.; VENTRE, J. **Photovoltaic Systems Engineering**. 2. ed. Boca Raton: [s.n.].

MESSENGER, R. A.; VENTRE, J. **Photovoltaic Systems Engineering**. 2. ed. Boca Raton: [s.n.].

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/>>. Acesso em: 19 jul. 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos**. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>>. Acesso em: 19 dez. 2023.

MOJAVER, M. et al. Comparative study on air gasification of plastic waste and conventional biomass based on coupling of AHP/TOPSIS multi-criteria decision analysis. **Chemosphere**, v. 286, p. 131867, 1 jan. 2022.

MORLEY, C. **Gaseq.** , 2005.

MOSAYEBNEZHAD, M. et al. Techno-economic assessment of biogas-fed CHP hybrid systems in a real wastewater treatment plant. **Applied Thermal Engineering**, v. 129, p. 1263–1280, 25 jan. 2018.

MOURA, C. H. S.; SILVEIRA, J. L.; LAMAS, W. DE Q. Dynamic production, storage, and use of renewable hydrogen: A technical-economic-environmental analysis in the public transport system in São Paulo state, Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 56, p. 31585–31598, 13 nov. 2020a.

MOURA, C. H. S.; SILVEIRA, J. L.; LAMAS, W. DE Q. Dynamic production, storage, and use of renewable hydrogen: A technical-economic-environmental analysis in the public transport system in São Paulo state, Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 56, p. 31585–31598, 13 nov. 2020b.

MUKHERJEE, C. et al. **A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 1 mar. 2020. . Acesso em: 11 nov. 2019

NAMI, H. et al. Techno-economic analysis of current and emerging electrolysis technologies for green hydrogen production. **Energy Conversion and Management**, v. 269, p. 116162, 1 out. 2022.

NASSER, M. et al. A review of water electrolysis–based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems. **Environmental Science and Pollution Research 2022 29:58**, v. 29, n. 58, p. 86994–87018, 25 out. 2022.

NGUYEN, H. N. et al. **Rice Husk Gasification: From Industry to Laboratory**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais...**Institute of Physics Publishing, 14 jun. 2018.

NJUGUNA MATHERI, A. et al. Waste to energy bio-digester selection and design model for the organic fraction of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1113–1121, 1 fev. 2018.

OKOLIE, J. A. et al. Waste biomass valorization for the production of biofuels and value-added products: A comprehensive review of thermochemical, biological and integrated processes. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 159, p. 323–344, 1 mar. 2022.

OZTURK, M.; DINCER, I. An integrated system for clean hydrogen production from municipal solid wastes. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 9, p. 6251–6261, 3 fev. 2021.

PEREIRA, N. M. F. **Monitorização de um sistema de valorização energética de biogás**. [s.l.] Universidade de Aveiro, 2015.

PÉREZ, N. P. **Modelagem fluidodinâmica do bagaço de cana-de-açúcar: projeto de gaseificador de leito fluidizado borbulhante**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2016.

PREFEITURA MUNICIPAL DA ESTÂNCIA TURÍSTICA DE GUARATINGUETÁ/SP. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS)**. Guaratinguetá: [s.n.].

PURMESSUR, B.; SURROOP, D. Power generation using landfill gas generated from new cell at the existing landfill site. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 3, p. 103060, 1 jun. 2019.

QIAN, Y. et al. **Review of the state-of-the-art of biogas combustion mechanisms and applications in internal combustion engines**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 1 mar. 2017. . Acesso em: 12 nov. 2019

RAFEY, A. et al. **A State-of-the-Art Review on the Technological Advancements for the Sustainable Management of Plastic Waste in Consort with the Generation of Energy and Value-Added Chemicals**. **Catalysts** MDPI, , 1 fev. 2023.

REGINA FRANCIÉLLE SILVA PAULINO. **Modelagem para dimensionamento de gaseificador a plasma: aspectos técnicos e econômicos**. [s.l.] Universidade Estadual de São Paulo, 2021.

REMY, F. **Potential for the anaerobic digestion of municipal solid waste (MSW) in the city of Curitiba, Brazil.** [s.l.] KTH Industrial Engineering and Management, 2018.

RIEMER, M.; DUSCHA, V. Carbon capture in blue hydrogen production is not where it is supposed to be - Evaluating the gap between practical experience and literature estimates. **Applied Energy**, v. 349, p. 121622, 1 nov. 2023.

ROBERTS, J. J. et al. Robust multi-objective optimization of a renewable based hybrid power system. **Applied Energy**, v. 223, p. 52–68, 1 ago. 2018.

RODRIGO-ILARRI, J.; RODRIGO-CLAVERO, M. E. Mathematical Modeling of the Biogas Production in MSW Landfills. Impact of the Implementation of Organic Matter and Food Waste Selective Collection Systems. **Atmosphere 2020, Vol. 11, Page 1306**, v. 11, n. 12, p. 1306, 1 dez. 2020.

ROJAS, J. et al. Technoeconomics and carbon footprint of hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, 11 jul. 2023.

RUDRA, S.; TESFAGABER, Y. K. Future district heating plant integrated with municipal solid waste (MSW) gasification for hydrogen production. **Energy**, v. 180, p. 881–892, 1 ago. 2019.

RUIZ, J. M. A. et al. **Análise De Eficiência Ambiental De Um Sistema Híbrido Solar Fotovoltaico – Eólico.** Belo Horizonte: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016a.

RUIZ, J. M. A. et al. **ANÁLISE DE EFICIÊNCIA AMBIENTAL DE UM SISTEMA HÍBRIDO SOLAR FOTOVOLTAICO : EÓLICO.** Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS. **Anais...**Belo Horizonte: 13 dez. 2016b.

RUSSO, M. A. T.; VIEIRA, J. M. P. **Modelo de previsão da produção de biogás em aterro sanitário. aplicação ao aterro de matosinhos.** Planeamento estratégico em águas e resíduos : actas do Encontro Nacional de Saneamento Básico. **Anais...**Cascais: 2006. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/7204>>

SAADABADI, S. A. et al. **Solid Oxide Fuel Cells fuelled with biogas: Potential and constraints.** **Renewable Energy** Elsevier Ltd, , 1 abr. 2019. . Acesso em: 12 nov. 2019

SAJID KHAN, M. et al. Techno-economic and exergo-economic evaluation of a novel solar integrated waste-to-energy power plant. **Applied Thermal Engineering**, v. 223, p. 119929, 25 mar. 2023.

SANTOS, R. E. DOS et al. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 231, p. 198–206, 1 fev. 2019.

SARAVANAKUMAR, A. et al. Pilot-scale study on downdraft gasification of municipal solid waste with mass and energy balance analysis. **Fuel**, v. 315, p. 123287, 1 maio 2022.

SHIVA KUMAR, S.; HIMABINDU, V. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 2, n. 3, p. 442–454, 1 dez. 2019.

SIDDIQUI, M. Z. et al. Recent approaches on the optimization of biomass gasification process parameters for product H₂ and syngas ratio: a review. **Environment, Development and Sustainability**, n. 0123456789, 2022.

SILVA DOS SANTOS, I. F. et al. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 131, p. 54–63, 1 abr. 2018.

SINGLITICO, A.; ØSTERGAARD, J.; CHATZIVASILEIADIS, S. Onshore, offshore or in-turbine electrolysis? Techno-economic overview of alternative integration designs for green hydrogen production into Offshore Wind Power Hubs. **Renewable and Sustainable Energy Transition**, v. 1, p. 100005, 1 ago. 2021.

SOARES, L. O.; DE MORAES, D. R.; BOLOY, R. A. M. Energy-Ecological Efficiency and TTW Emissions of the DFSIE Fuelled with Biofuels. **Bioenergy Research**, v. 14, n. 2, p. 623–633, 1 jun. 2021.

STAFFELL, I. **The Energy and Fuel Data Sheet**. Birmingham: [s.n.]. Disponível em: <http://www.claverton-energy.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/08/the_energy_and_fuel_data_sheet1.pdf>. Acesso em: 16 maio. 2019.

SUNG, T.; KIM, S.; KIM, K. C. Thermo-economic analysis of a biogas-fueled micro-gas turbine with a bottoming organic Rankine cycle for a sewage sludge and food waste treatment plant in the Republic of Korea. **Applied Thermal Engineering**, v. 127, p. 963–974, 25 dez. 2017.

SZABÓ, S. et al. A methodology for maximizing the benefits of solar landfills on closed sites. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 1291–1300, 1 set. 2017.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues**. Seattle: [s.n.].

TEBIBEL, H. Methodology for multi-objective optimization of wind turbine/battery/electrolyzer system for decentralized clean hydrogen production using an adapted power management strategy for low wind speed conditions. **Energy Conversion and Management**, v. 238, p. 114125, 15 jun. 2021.

UFPEL. **Núcleo de Planejamento Ambiental**. Disponível em: <<https://wp.ufpel.edu.br/npa/residuos-quimicos/>>. Acesso em: 9 jan. 2024.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Quantifying Methane Emissions from Landfilled Food Waste**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-10/food-waste-landfill-methane-10-8-23-final_508-compliant.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2024.

USEPA. **Emissions Estimation Tools**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/emissions-estimation-tools>>. Acesso em: 7 ago. 2023.

VALENTE SANTOS, M. A. **Avaliação do potencial de produção de Biohidrogénio na ETVO da Valorsul**. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2020.

VARGAS, F. E. S.; FAJARDO, C. A. G. Producción de gas de síntesis libre de alquitranes en un horno rotatorio a partir de madera de haya (*Fagus sylvatica*) mediante catálisis con dolomita. **Revista Informador Técnico**, v. 74, p. 31–40, 2010.

VITÁZEK, I. et al. Thermodynamics of combustion gases from biogas. **Research in Agricultural Engineering**, v. 62, n. 10, p. S8–S13, 2016.

VONK, G. et al. Comparative analysis of wood and solid recovered fuels gasification in a downdraft fixed bed reactor. **Waste Management**, v. 85, p. 106–120, 15 fev. 2019.

WANG, J. et al. Modeling and performance analysis of CCHP (combined cooling, heating and power) system based on co-firing of natural gas and biomass gasification gas. **Energy**, v. 93, p. 801–815, 15 dez. 2015.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Perspective - Cost of Energy Technologies** World Energy Council. London: [s.n.]. Disponível em: <http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/WEC_J1143_CostofTECHNOLOGIES_021013_WEB_Final.pdf>.

WORLD ENERGY COUNCIL. **Hydrogen on the Horizon: Ready, Almost Set, Go?** London: [s.n.]. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf> <<https://www.worldenergy.org/publications/entry/working-paper-hydrogen-on-the-horizon-national-hydrogen-strategies>>.

XI, W. et al. **Electrolyzers in the System Advisor Model (SAM): A Techno-Economic Potential Study**. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2023.

YADAV, D.; BANERJEE, R. Net energy and carbon footprint analysis of solar hydrogen production from the high-temperature electrolysis process. **Applied Energy**, v. 262, p. 114503, 15 mar. 2020.

YAMAN, C.; ANIL, I.; ALAGHA, O. Potential for greenhouse gas reduction and energy recovery from MSW through different waste management technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, p. 121432, 10 ago. 2020.

YANG, L. **Biogas Cleaning and Upgrading Technologies**. Disponível em: <<https://ohioline.osu.edu/factsheet/AEX-653.1-14>>. Acesso em: 7 ago. 2023.

ZISHEN MOU, C. S. P. K. Evaluating the methane generation rate constant (k value) of low-organic waste at Danish landfills. **Waste Management**, v. 35, p. 170–176, 2015.