



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

**Uso de resíduos urbanos para a produção de bioenergia: Modelo de
central de utilidades para aplicação na administração pública de
municípios brasileiros**

CARLOS HENRIQUE SILVA MOURA

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

**Uso de resíduos urbanos para a produção de bioenergia: Modelo de
central de utilidades para aplicação na administração pública de
municípios brasileiros**

CARLOS HENRIQUE SILVA MOURA

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: José Luz Silveira

**Rio Claro – SP
2024**

M929u	Moura, Carlos Henrique Silva Uso de resíduos urbanos para a produção de bioenergia : modelo de central de utilidades para aplicação na administração pública de municípios brasileiros / Carlos Henrique Silva Moura. -- Rio Claro, 2024 138 p. : il., tabs. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Pesquisa em Bioenergia, Rio Claro Orientador: José Luz Silveira 1. Resíduos Urbanos. 2. Bioenergia. 3. Gaseificação. 4. Digestão Anaeróbia. 5. Transesterificação. I. Título.
-------	--

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Uso de resíduos urbanos para a produção de bioenergia: Modelo de central de utilidades para aplicação na administração pública de municípios brasileiros

AUTOR: CARLOS HENRIQUE SILVA MOURA

ORIENTADOR: JOSE LUZ SILVEIRA

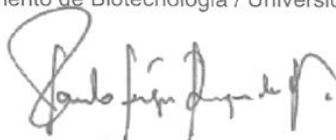
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências, área: Bioenergia pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JOSE LUZ SILVEIRA (Participação Presencial)
Instituto de Pesquisa em Bioenergia IPBEN / Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratingueta



Prof. Dr. SILVIO SILVERIO DA SILVA (Participação Presencial)
Departamento de Biotecnologia / Universidade de São Paulo - Campus de Lorena



Prof. Dr. PAULO SÉRGIO DUQUE DE BRITO (Participação Virtual)
Centro de Investigação para a Valorização de Recursos Endógenos / Instituto Politécnico de Portalegre (Portugal)



Prof. Dr. THIAGO AVERALDO BIMESTRE (Participação Presencial)
Departamento de Química e Energia / Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratingueta

Rio Claro, 02 de dezembro de 2024

Dedico e consagro este trabalho a Deus.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria e conhecimento, que possibilitou a conclusão deste trabalho.

Agradeço também a minha família e meus amigos, em especial aos meus pais *Valter* e *Maria Auxiliadora*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos e me impulsionaram a não desistir,

ao meu orientador e coorientador, *Prof. Dr. José Luz Silveira* e *Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna*, respectivamente, que jamais deixaram de me incentivar. Sem a orientação, dedicação e o auxílio deles, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível,

aos meus amigos e parceiros desta jornada na vida acadêmica, em especial, a *Luciana*, *Lucas Pamplona*, *Victor*, *Raul*, *Lucas Rezende* e *Lúcia*, os quais não apenas me apoiaram e ajudaram, como também suavizaram todo o percurso,

ao Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN - UNESP) - Laboratório Associado de Guaratinguetá e Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos (LOSE - FEG - UNESP) por todo suporte fornecido,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento

e aos funcionários do Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN - UNESP) – Câmpus Rio Claro pela dedicação e alegria no atendimento.

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

“A sabedoria é o uso correto do conhecimento. Saber não é ser sábio. Muitos homens sabem muito, e são os maiores tolos por isso. Não existe um tolo tão grande como um tolo sabedor. Mas saber como usar o conhecimento é ter sabedoria.”

Charles Spurgeon.

RESUMO

Essa pesquisa tem como objetivo analisar a proposta de uma central de utilidades em municípios brasileiros que vise a recuperação energética através dos resíduos urbanos para a produção de bioenergia a partir dos processos de gaseificação, digestão anaeróbia e transesterificação, bem como a adequação dos padrões de edifícios do poder público municipal existentes para concessão de certificação de construção verde. A metodologia proposta para a análise energética consiste em usar os resíduos urbanos para produções de biogás através da digestão anaeróbia e gás de síntese através da gaseificação, sendo ambos para serem queimados em motor de combustão interna-gerador a fim de gerar energia elétrica para as instalações do poder público municipal, também utiliza-se óleo de cozinha usado (residual) para o processo de transesterificação para produção de biodiesel que posteriormente pode ser usado nas frotas de veículos do poder público municipal. A metodologia da análise econômica visa a viabilidade econômica considerando a receita anual esperada com a eletricidade gerada a fim de determinar o potencial de fluxo financeiro positivo. A análise ambiental fundamenta-se em determinar a eficiência ecológica considerando os motores de combustão interna-gerador acionados pelo gás de síntese e biogás para geração de eletricidade e apenas o motor de combustão interna com biodiesel para uso convencional. Os resultados obtidos da análise energética demonstram a eficiência e viabilidade da central de utilidades quanto a geração de energia elétrica, chegando a produzir até 9 vezes o necessário para atingir a autonomia energética a depender do caso, e uma produção expressiva de biodiesel, possibilitando a concessão da certificação de edifício verde. Dos casos analisados, apenas os municípios com 100.000 e 500.000 habitantes tiveram viabilidade econômica para execução da central de utilidades. Quanto a análise ambiental, os resultados referentes a geração de energia elétrica ficaram entre 0,45 – 0,50, indicando uma eficiência mediana. Conclui-se que a proposta de central de utilidades em municípios brasileiros que vise a recuperação energética através dos resíduos urbanos para a produção de bioenergia é viável dos aspectos energético, econômico e ambiental para municípios que tenham 100.000 habitantes ou mais.

Palavras-chave: Resíduos Urbanos. Bioenergia. Gaseificação. Digestão Anaeróbia. Transesterificação.

ABSTRACT

This research aims to analyze the proposal for a utility plant in Brazilian municipalities that aims at energy recovery through urban waste for the production of bioenergy from gasification, anaerobic digestion and transesterification processes, as well as the adaptation of the standards of existing municipal government buildings for granting green building certification. The proposed methodology for the technical-energy analysis consists of using urban waste to produce biogas through anaerobic digestion and synthesis gas through gasification, both to be burned in an internal combustion engine-generator in order to generate electricity for municipal government facilities. Used cooking oil (residual) is also used for the transesterification process to produce biodiesel that can later be used in municipal government vehicle fleets. The methodology of the economic analysis aims at economic viability considering the expected annual revenue from the electricity generated in order to determine the potential for positive financial flow. The environmental analysis is based on determining the ecological efficiency considering the internal combustion engine-generator driven by synthesis gas and biogas for electricity generation and only the internal combustion engine with biodiesel for conventional use. The results obtained from the energetic analysis demonstrate the efficiency and viability of the utility plant in terms of electricity generation, producing up to 9 times the amount needed for energy self-sufficiency, depending on the case, and a significant production of biodiesel, enabling the granting of the green building certification. Of the cases analyzed, only the municipalities with 100,000 and 500,000 inhabitants had economic viability for the execution of the utility plant. Regarding the environmental analysis, the results related to electricity generation were between 0.45 and 0.50, indicating average efficiency. It is concluded that the proposal for a utility plant in Brazilian municipalities that aims at energy recovery through urban waste for the production of bioenergy is viable from the technical-energetic, economic and environmental aspects for municipalities with 100,000 inhabitants or more.

Keywords: Urban Waste. Bioenergy. Gasification. Anaerobic Digestion. Transesterification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos no mundo	27
Figura 2 – Composição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos no Brasil	28
Figura 3 – Disposição de resíduos sólidos urbanos adotada nos municípios Brasileiros	32
Figura 4 – Tecnologias para conversão de resíduos sólidos urbanos em energia....	34
Figura 5 – Biodigestor de modelo indiano	37
Figura 6 – Biodigestor de modelo chinês	38
Figura 7 – Biodigestor de modelo canadense	39
Figura 8 – Etapas do processo de produção de biogás através da digestão anaeróbia	41
Figura 9 – Etapas e reações da gaseificação de resíduos sólidos urbanos	42
Figura 10 – Esquema de gaseificador de leito fixo de corrente ascendente	46
Figura 11 – Esquema de gaseificador de leito fixo de corrente descendente	46
Figura 12 – Esquema de gaseificador de leito fluidizado borbulhante	48
Figura 13 – Esquema de gaseificador de leito fluidizado circulante	48
Figura 14 – Esquema de gaseificador de leito de fluxo arrastado	50
Figura 15 – Esquema simplificado da proposta de central de utilidades para geração de bioenergia a partir de resíduos urbanos para administração pública de municípios brasileiros com certificação sustentável	59
Figura 16.a - Energia elétrica gerada através do biogás (EBiogás) e gás de síntese (Esyngas) vs. Consumo médio de eletricidade do poder público municipal (EConsPP)	82
Figura 16.b – Detalhe - Energia elétrica gerada através do biogás (EBiogás) e gás de síntese (Esyngas) vs. Consumo médio de eletricidade do poder público municipal (EConsPP)	82
Figura 17 – Caso 1: Custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades	85
Figura 18 – Caso 1: Receita anual esperada pela eletricidade gerada (<i>payback</i>)	86
Figura 19 – Caso 2: Custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades	86
Figura 20 – Caso 2: Receita anual esperada pela eletricidade gerada (<i>payback</i>)	87
Figura 21 – Caso 3: Custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades	87

Figura 22 – Caso 3: Receita anual esperada pela eletricidade gerada (<i>payback</i>)	88
Figura 23 – Caso 4: Custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades	88
Figura 24 – Caso 4: Receita anual esperada pela eletricidade gerada (<i>payback</i>)	89
Figura 25 – Caso 5: Custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades	89
Figura 26 – Caso 5: Receita anual esperada pela eletricidade gerada (<i>payback</i>) ...	90
Figura 27 – Caso 6: Custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades	90
Figura 28 – Caso 6: Receita anual esperada pela eletricidade gerada (<i>payback</i>)	91
Figura 29 - Mapa de localização da cidade de Guaratinguetá	94
Figura 30 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos de Guaratinguetá	95
Figura 31 - Energia elétrica gerada através do biogás (<i>EBiogás</i>) e gás de síntese (<i>Esyngas</i>) vs. Consumo médio de eletricidade do poder público municipal (<i>EConsPP</i>) para Guaratinguetá	99
Figura 32 - Guaratinguetá: Custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades	100
Figura 33 - Guaratinguetá: Receita anual esperada pela eletricidade gerada (<i>payback</i>)	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos resíduos quanto à origem e à periculosidade	23
Tabela 2 – Produção de biogás a partir de diferentes substratos orgânicos sólidos.	39
Tabela 3 – Divisão de municípios por porte populacional	60
Tabela 4 – Composição do gás de síntese	63
Tabela 5 – Propriedades do óleo de cozinha usado	66
Tabela 6 - Parâmetros da análise econômica	68
Tabela 7 – Geração média estimada de resíduos urbanos diários por porte populacional	73
Tabela 8 – Estimativa média de instalações do poder público por município e seus respectivos gastos médios com eletricidade por porte populacional	74
Tabela 9 – Geração média estimada de lodo (parcial) e da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos diários por porte populacional.....	75
Tabela 10 – Dimensionamento dos biodigestores e suas quantidades, tempo de retenção e produção de biogás estimada	75
Tabela 11 – Especificações técnicas dos motores de combustão interna a biogás ..	76
Tabela 12 – Seleção de motores de combustão interna a biogás e suas quantidades, consumo de biogás e geração de energia elétrica	76
Tabela 13 – Geração média estimada de lodo (parcial), plástico, papel e papelão, madeira, têxtil, couro e borracha, diários por porte populacional	77
Tabela 14 – Quantidade total de mistura combustível gerada diariamente.....	78
Tabela 15 – Especificações técnicas dos gaseificadores de leito fluidizado	78
Tabela 16 – Seleção de gaseificadores de leito fluidizado e suas quantidades, consumo de mistura combustível e produção de gás de síntese	79
Tabela 17 – Especificações técnicas dos motores de combustão interna a gás de síntese.....	79
Tabela 18 – Seleção de motores de combustão interna a gás de síntese e suas quantidades, consumo de gás de síntese e geração de energia elétrica	80
Tabela 19 – Cálculo energético da central de utilidades	81
Tabela 20 – Geração média estimada de óleo residual e produção média estimada de biodiesel	84
Tabela 21 - Investimentos realizados em cada caso analisado	84
Tabela 22 – Economia anual esperada pela utilização do Biodiesel.....	91

Tabela 23 - Resultados dos indicadores de poluição	92
Tabela 24 - Resultados dos indicadores de eficiência ecológica	92
Tabela 25 - Dados sobre o município de Guaratinguetá	95
Tabela 26 - Geração média estimada de lodo (parcial) e da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (parcial) diários para Guaratinguetá	96
Tabela 27 – Dimensionamento dos biodigestores e suas quantidades, tempo de retenção e produção de biogás estimada para Guaratinguetá.....	96
Tabela 28 – Seleção de motores de combustão interna a biogás e suas quantidades, consumo de biogás e geração de energia elétrica para Guaratinguetá	96
Tabela 29 – Geração média estimada de lodo (parcial), fração orgânica (parcial), plástico, papel e papelão e mistura combustível para Guaratinguetá	97
Tabela 30 – Seleção de gaseificadores de leito fluidizado e suas quantidades, consumo de mistura combustível e produção de gás de síntese para Guaratinguetá	97
Tabela 31 – Seleção de motores de combustão interna a gás de síntese e suas quantidades, consumo de gás de síntese e geração de energia elétrica para Guaratinguetá.....	98
Tabela 32 – Cálculo energético da central de utilidades para Guaratinguetá	98
Tabela 33 – Geração estimada de óleo residual e produção de biodiesel para Guaratinguetá.....	99
Tabela 34 - Investimentos realizados para Guaratinguetá	99
Tabela 35 – Economia anual esperada pela utilização do Biodiesel.....	101
Tabela 36 – Guaratinguetá: Resultados dos indicadores de poluição.....	101
Tabela 37 – Guaratinguetá: Resultados dos indicadores de eficiência ecológica ...	102

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ANA – Agência Nacional de Águas

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

GBC – *Green Building Council*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organizações das Nações Unidas

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PLD – Preço de Liquidação das Diferenças

PVC – Policloreto de Vinila

RSB – Resíduos de Saneamento Básico

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

RU – Resíduos Urbanos

SINIR – Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos

LISTA DE SÍMBOLOS

AGL: ácido graxos livres [%]

C_{Elet} : custo da eletricidade da concessionária [US\$/kWh]

C_{geCU} : custo da energia elétrica gerada pela central de utilidades [US\$/kWh]

$C_{op.manCU}$: custo de operação e manutenção da central de utilidades [US\$/kWh]

C_{comb_b} : custo do combustível – biogás [US\$/kWh]

C_{comb_s} : custo do combustível – gás de síntese [US\$/kWh]

COV : carga orgânica volumétrica [$kg_{SV}/m^3 \cdot dia$]

$(CO_2)_{eq}$: concentração de dióxido de carbono equivalente [$kg(CO_2)_{eq}/kg_{comb}$]

E_{pmci} : potência elétrica produzida pelo motor de combustão interna [kW]

E_{comb} : potência provinda do combustível [kW]

E_{comb_b} : potência provinda do combustível – biogás [kW]

E_{comb_s} : potência provinda do combustível – gás de síntese [kW]

E_{Elet} : excedente de energia elétrica anual [MWh/ano]

$E_{pmci.b}$: potência elétrica produzida pelo motor de combustão interna - biogás [kW]

$E_{pmci.s}$: potência elétrica produzida pelo motor de combustão interna - gás de síntese [kW]

f : fator de anuidade [1/ano]

FO : quantidade da fração orgânica nos resíduos sólidos urbanos gerados diariamente [kg/dia]

G_{el} : rendimento anual esperado ao longo de um período [US\$]

H : período de operação da central de utilidades [h/ano]

H_p : entalpia do produto da combustão [kJ/kmol]

H_r : entalpia do reagente na combustão [kJ/kmol]

Inv : investimento da central de utilidades [US\$]

k : período de amortização de capital [anos]

$kgoe/tMSW$: quilograma de óleo equivalente por tonelada de resíduo sólido municipal [-]

LE : quantidade de lodo de esgoto gerada diariamente [kg/dia]

$MM_{biogás}$: massa molar do biogás [kg/kmol]

MM_{CH_4} : massa molar do metano [kg/kmol]

MM_{CO_2} : massa molar do dióxido de carbono [kg/kmol]

MM_{NaOH} : massa molecular do hidróxido de sódio [g/mol]

$\dot{m}_{comb_{fab}}$: fluxo mássico de combustível dado pelo fabricante [kg/s]

$\dot{m}_{comb_{real}}$: fluxo mássico de combustível calculado para o PCI do combustível usado [kg/s]

N : Normalidade da solução de hidróxido de sódio [g].

PA : Peso da amostra [g]

$PCI_{biogás}$: poder calorífico inferior do biogás [kJ/kg]

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

PCI_{CH_4} : poder calorífico inferior do metano [kJ/kg]

PCI_{CO} : poder calorífico inferior do monóxido de carbono [kJ/kg]

PCI_{H_2} : poder calorífico inferior do hidrogênio [kJ/kg]

PCI_{syngas} : poder calorífico inferior do gás de síntese [kJ/kg]

$PCI_{mist_{comb}}$: poder calorífico da mistura combustível que alimenta o gaseificador [kJ/kg]

PLD : preço de liquidação das diferenças [US\$/MWh]

$P_{sec(cons)}$: potência elétrica consumida pelos demais componentes do sistema [kW]

P_{CU} : potência da central de utilidades [kW]

Q : quantidade de substrato gerado diariamente [m³/dia]

r : taxa anual de juros [%]

$Rend_{syngas}$: rendimento da produção de gás de síntese por quilo da mistura combustível [-]

S_o : concentração de sólidos voláteis na mistura [kg_{SV}/m^3]

TRH : tempo de retenção hidráulica [dias]

V : volume do biodigestor a ser construído [m³]

$V_{biodiesel}$: volume de biodiesel produzido no processo de transesterificação [L]

V_{OCU} : volume de óleo de cozinha usado [L]

y_{CH_4} : fração volumétrica do metano na mistura gasosa [-]

y_{CO} : fração volumétrica do monóxido de carbono na mistura gasosa [-]

y_{H_2} : fração volumétrica do hidrogênio na mistura gasosa [-]

SÍMBOLOS GREGOS

$\Delta\bar{h}$: diferença entálpica [kJ/kmol]

$\bar{h}_f^0$: entalpia [kJ/kmol]

α : fator de conversão de densidade para matéria orgânica [m³/kg]

ε : indicador eficiência ecológica [-]

$\eta_{biodiesel}$: eficiência de conversão do óleo de cozinha usado em biodiesel [-]

η_{gf} : eficiência de gás frio [-]

η_{emci} : eficiência elétrica de conversão do motor de combustão interna [-]

Π_p : indicador de poluição [kgCO₂/MJ]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Contextualização do Problema	18
1.2	Objetivos	20
1.3	Contribuição da Tese	21
1.4	Estrutura da Tese	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Resíduos Urbanos	23
2.1.1	Resíduos Sólidos Urbanos.....	24
2.1.1.1	<i>Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos.....</i>	<i>26</i>
2.1.2	Resíduos dos Serviços Públicos de Saneamento Básico	28
2.1.3	Resíduos de Óleos e Gorduras Vegetais.....	29
2.1.4	Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	31
2.2	Tecnologias para Processamento de Resíduos Urbanos e Sua Conversão em Energia.....	33
2.2.1	Digestão Anaeróbia.....	34
2.2.1.1	<i>Tipos de biodigestores.....</i>	<i>36</i>
2.2.1.1.1	<u>Modelo Indiano</u>	<u>36</u>
2.2.1.1.2	<u>Modelo Chinês.....</u>	<u>37</u>
2.2.1.1.3	<u>Modelo Canadense</u>	<u>38</u>
2.2.1.2	<i>Biogás.....</i>	<i>39</i>
2.2.2	Gaseificação	42
2.2.2.1	<i>Tipos de Gaseificadores</i>	<i>45</i>
2.2.2.1.1	<u>Gaseificador de leito fixo</u>	<u>45</u>
2.2.2.1.2	<u>Gaseificador de leito fluidizado.....</u>	<u>47</u>
2.2.2.1.3	<u>Gaseificador de leito de fluxo arrastado</u>	<u>49</u>
2.2.2.2	<i>Gás de Síntese</i>	<i>50</i>
2.2.3	Aplicação de Gases em Motor de Combustão Interna.....	51
2.2.4	Transesterificação.....	52
2.2.4.1	<i>Transesterificação em Uma Etapa.....</i>	<i>53</i>
2.2.4.2	<i>Transesterificação em Duas Etapas</i>	<i>54</i>
2.2.4.3	<i>Biodiesel.....</i>	<i>55</i>
2.3	Certificações para Edificações Verdes.....	56
2.3.1	GBC Brasil Zero Energy.....	57
3	METODOLOGIA.....	59
3.1	Proposta de Central de Utilidade para Geração de Bioenergia a partir de Resíduos Urbanos para Municípios Brasileiros	59
3.2	Análise Energética.....	60
3.2.1	Biogás	60
3.2.2	Biodigestor	62

3.2.3	Gás de Síntese	63
3.2.4	Gaseificador	64
3.2.5	Motor de Combustão Interna a Gás	64
3.2.6	Transesterificação	66
3.2.7	Biodiesel	67
3.3	Análise Econômica.....	68
3.3.1	Fator de Anuidade.....	69
3.3.2	Custo da Eletricidade Gerada pela Central de Utilidades	69
3.3.3	Receita Anual Esperada pela Eletricidade Gerada	70
3.4	Análise Ambiental.....	71
3.4.1	Indicador de Eficiência Ecológica.....	71
3.4.2	Indicador de Poluição.....	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1	Resultados e Discussões da Análise Energética	73
4.1.1	Biodigestor, Biogás e Motor de Combustão Interna a Biogás.....	74
4.1.2	Gaseificador, Gás de Síntese e Motor de Combustão Interna a Gás de Síntese	77
4.1.3	Cálculo Energético	80
4.1.3.1	<i>Aplicabilidade do Excedente Energético.....</i>	83
4.1.4	Transesterificação e Biodiesel	83
4.2	Resultados e Discussões da Análise Econômica.....	84
4.3	Resultados e Discussões da Análise Ambiental	92
5	ESTUDO DE CASO.....	94
6	CONCLUSÕES	103
	REFERÊNCIAS.....	106
	ANEXO A – CATÁLOGO DA ERBR DOS GRUPOS GERADORES A GÁS: BIOGÁS, GÁS NATURAL, SYNGAS, GLP	129
	ANEXO B – CATÁLOGO DA KEXIN DE GASEIFICADORES	131

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Problema

Observou-se, nas últimas cinco décadas, um grande crescimento populacional, que até o ano de 2021, resultou em uma população mundial de 7,89 bilhões de habitantes, dos quais 4,45 bilhões de pessoas estavam em áreas urbanas (THE WORLD BANK, 2021); sendo que é esperado que aproximadamente dois-terços da população global venha a residir em áreas urbanas (ABRAHAM et al., 2022). Esse crescimento populacional atrelado aos processos de urbanização e industrialização resultaram em diversos impactos negativos, dos quais pode-se destacar quatro pontos: esgotamento dos recursos naturais (ZUCARO; MASELLI; ULGIATI, 2022), crescimento da utilização de energia primária (MOURA; SILVEIRA; LAMAS, 2020), segurança energética (KUMAR et al., 2023) e a geração de resíduos, especialmente os resíduos urbanos – sejam sólidos, óleos e gorduras vegetais ou mesmo os oriundos dos serviços públicos de saneamento (BHAMBORE; SURESH KUMAR, 2022). Tais mudanças impactaram diretamente as relações estabelecidas entre as cidades e o meio ambiente, dificultando assegurar os princípios da sustentabilidade nos sistemas urbanos (ZUCARO; MASELLI; ULGIATI, 2022), que tem como objetivo atender às necessidades essenciais de todos os indivíduos, ao mesmo tempo em que oferece a eles a chance de melhorar suas vidas sem prejudicar a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades (WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, 1987).

A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) está diretamente ligada a uma aceleração do processo de globalização que é impulsionado pelo crescimento populacional e a acentuação da urbanização, contudo, pode-se observar que os hábitos de consumo são fortemente influenciados pelo acesso aos serviços públicos mais do que pelo poder de compra (MENDOZA et al., 2022), atualmente a geração de resíduos a nível mundial é estimada em entorno de 2 bilhões de toneladas métricas por ano (Mt/ano) podendo chegar até 2,59 bilhões Mt/ano até 2030 (MAALOUF; MAVROPOULOS; EL-FADEL, 2020). A média mundial de geração de resíduos é de 0,74 kg/capita/dia, contudo, somente as regiões da África Subsaariana, do Sul e Leste da Ásia e o Pacífico encontram-se com médias regionais abaixo da mundial (entre 0,46-0,56 kg/capita/dia) enquanto as demais regiões encontram-se bem acima deste

valor, destacando a América do Norte que tem uma média de 2,21 kg/capita/dia (KAZA et al., 2018).

Mesmo com um aumento progressivo na geração de resíduos em todo o mundo, ainda são poucos os métodos adotados para disposição final deles, sendo alguns deles inadequados e/ou de manejo complexo (RUBIO-JIMENEZ et al., 2023). Pode-se destacar como as principais formas de disposição final atualmente os lixões abertos, aterros não especificados, reciclagem e incineração, somente uma pequena porcentagem está relacionada aos aterros sanitários, compostagem, aterros controlados e ainda outras formas (KAZA et al., 2018; LEE, 2022).

Os meios mais eficazes para o gerenciamento de resíduos, sejam sólidos ou líquidos, estão relacionados com a implementação de políticas públicas, como é o caso dos planos de resíduos sólidos a nível nacional, estadual e municipal, e de um sistema de gestão que esteja em de acordo com o plano pré-estabelecido, que deverão contemplar coleta, transferência, recuperação de recursos, reciclagem e tratamento ou destinação, a fim de priorizar a mitigação dos impactos adversos causados (MERLOTO et al., 2023; REBEHY et al., 2023). Os efeitos negativos identificados dos resíduos urbanos, independentes do seu estado físico, podem afetar o ar, o solo, as águas subterrâneas, os canais fluviais, as vias públicas e até o oceano, sem contar a saúde humana e também contribuir para as mudanças climáticas (DOS REIS; FERNANDES, 2021; KHAN et al., 2022b).

Ao tratar da recuperação de recursos, podemos destacar a recuperação energética a qual apresenta estratégias e tecnologias menos poluentes, como é o caso da gaseificação que pode fazer uso de RSU como matéria-prima; essa tecnologia é um processo termoquímico que os convertem em combustível gasoso, o gás de síntese ou “syngas”, que ao ser associado à motores de combustão interna e geradores produzem energia elétrica (FERRAZ DE CAMPOS et al., 2021; MOTA-PANIZIO et al., 2020). O gás de síntese tem em sua composição concentrações variantes de N₂ de 45-54%, CO de 8-25%, H₂ de 13-15%, H₂O de 10-15%, CO₂ de 5-10% e CH₄ de 3-9% (MALUF FILHO; COELHO; PERECIN, 2022).

Ao se falar de RSU, engloba-se também a fração biodegradável desses resíduos, e juntamente a ela pode-se acrescentar também o lodo de esgoto não tratado, essa combinação apresenta grande potencial de geração de biogás através da digestão anaeróbia (AL BKOOR ALRAWASHDEH et al., 2017). A digestão de pelo menos dois resíduos diferentes apresenta vantagens em comparação a digestão de

resíduos sozinhos, como maior estabilidade do processo, aumento na produção de biogás e metano, diluição de compostos tóxicos, entre outros (GUVEN et al., 2018). Assim como o gás de síntese, o biogás também pode ser associado à motores de combustão interna e geradores a fim de produzir energia elétrica (MOURA; SILVEIRA; LAMAS, 2020).

Ainda tratando-se da fração biodegradável dos RSU, pode-se direcionar a parte que compreende os óleos vegetais usados e gorduras para o processo de transesterificação, que é um processo de conversão físico-químico para produção de biodiesel (YAASHIKAA et al., 2020). O biodiesel é uma solução alternativa para o esgotamento dos combustíveis fósseis (BARAMPOUTI et al., 2019) além de ser menos nocivo ao meio ambiente (MISRA et al., 2017), podendo ser aplicado, por exemplo, a frota de caminhões (CAO et al., 2020) e ônibus (SHETH; SARKAR; MUKHOPADHYAY, 2021).

O desenvolvimento de infraestrutura não afeta apenas o aspecto econômico, mas também social e ambiental, essas são as principais dimensões do desenvolvimento sustentável. Muitos aspectos e fatores envolvidos no desenvolvimento da infraestrutura urbana requerem uma política abrangente e integrada voltada para a sustentabilidade. Portanto, é necessário formular uma política de desenvolvimento de infraestrutura que considere várias dimensões do desenvolvimento sustentável (PERSADA et al., 2018).

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é estudar a formulação de uma central de utilidades em municípios brasileiros que vise a recuperação energética através dos resíduos sólidos urbanos com a produção de bioeletricidade e biocombustível a partir dos processos de gaseificação, digestão anaeróbia e transesterificação e a certificação de edifícios públicos existentes a um padrão de construção verde.

Tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Estudar e analisar a composição dos resíduos sólidos urbanos e qual o potencial energético de cada um;
- Estudar os processos de gaseificação, digestão anaeróbia e transesterificação para produção de bioenergia;

- Analisar qual tipo de certificação para edificações verdes é mais compatível para o estudo;
- Realizar análises energéticas para compreender o tamanho do sistema a ser desenvolvido para implantação da central de utilidades para geração de bioenergia;
- Realizar análises econômicas para averiguar a viabilidade econômica da implantação da central de utilidades;
- Realizar análise de impacto ambiental para mensurar os impactos ambientais por meio uso de bioenergia.

1.3 Contribuição da Tese

O desenvolvimento de uma infraestrutura urbana sustentável e resiliente conta não apenas o acesso a um conjunto de serviços básicos como telefonia, distribuição de água, transporte público etc., mas também de uma boa gestão e gerenciamento dos RSU, geração de energia limpa, desenvolvimento de políticas públicas para incentivo de construções sustentáveis, ações para mitigação dos impactos ambientais, os quais exercem função indispensável para concretização diretamente de 3 dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) que são energia acessível e limpa, cidades e comunidades sustentáveis e combate às alterações climáticas, mas que de forma indireta auxiliam também no cumprimento de pelo menos mais 2 ODS que são boa saúde e bem-estar e água limpa e saneamento.

Sendo assim, torna-se indispensável o estudo da formulação de uma política pública voltada para infraestrutura urbana sustentável que contemple uma gestão e gerenciamento de RSU voltadas para a recuperação energética - bioeletricidade e biocombustível - a fim de resultar numa autonomia energética parcial para o município, gerando assim diminuição nos gastos com a destinação desses resíduos para aterros sanitários, o que promoverá um aumento na vida útil deles, e também a certificação de prédios públicos a padrões de edifícios verdes com intuito de minimizar consumo de energia elétrica e alcançar a eficiência energética, visando uma diminuição das contas públicas e busca por um padrão mais sustentável.

1.4 Estrutura da Tese

Esta tese foi dividida em cinco capítulos, os quais são descritos resumidamente a seguir.

O capítulo 1 refere-se a uma contextualização do problema que motivou o aprofundamento no assunto abordado neste trabalho, seus objetivos, contribuições e estrutura.

O capítulo 2 refere-se à revisão bibliográfica abordando os resíduos urbanos, com ênfase nos resíduos sólidos urbanos, nos resíduos de óleos e gorduras vegetais e nos resíduos de serviços públicos de saneamento básico, as tecnologias para processamento de resíduos urbanos em energia e certificações verdes, destacando as que visam a autonomia energética.

O capítulo 3 refere-se à proposta de central de utilidades para geração de bioenergia a partir de resíduos sólidos de municípios e as metodologias usadas para as análises energética, econômica e ambiental da central de utilidades modelada para diferentes casos.

O capítulo 4 refere-se aos resultados obtidos das análises energética, econômica e ambiental da central de utilidades modelada para os diferentes casos.

O capítulo 5 refere-se ao estudo de caso da cidade de Guaratinguetá – São Paulo, no qual aplica-se as análises propostas no capítulo 3.

O capítulo 6 refere-se às conclusões finais das análises para a tese, mostrando de forma geral os resultados obtidos em cada uma das análises realizadas do modelo proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos Urbanos

A gestão de resíduos é uma questão global que afeta indivíduos, comunidades e governos. Decisões ruins e inadequadas de gerenciamento de resíduos podem afetar a saúde diária, limpeza e produtividade, afetando assim o desenvolvimento econômico em todos os níveis da sociedade. Algumas das questões incluem a contaminação dos oceanos, inundações, esgotos entupidos, doenças respiratórias, partículas transportadas pelo ar, consumo de resíduos por animais e poluição do ar e da terra (CAYUMIL et al., 2021). À medida que a população mundial continua a crescer também ocorre uma rápida urbanização e a produção de resíduos urbanos aumenta simultaneamente (KHAN et al., 2022a). Devido à grande variação na composição e características dos resíduos, os diferentes tipos de resíduos podem ser classificados quanto à origem e à periculosidade, que podem ser observados na Tabela 1 (BRASIL, 2010).

Tabela 1 – Classificação dos resíduos quanto à origem e à periculosidade

Origem	Periculosidade
Resíduos Domiciliares	Resíduos Perigosos
Resíduos de Limpeza Urbana	Resíduos Não Perigosos
Resíduos Sólidos Urbanos	
Resíduos de Estabelecimentos	
Comerciais e Prestadores de Serviços	
Resíduos dos Serviços Públicos de	
Saneamento Básico	
Resíduos Industriais	
Resíduos de Serviços de Saúde	
Resíduos da Construção Civil	
Resíduos Agrossilvopastoris	
Resíduos de Serviços de Transportes	
Resíduos de Mineração	

Fonte: BRASIL (2010).

Estima-se que anualmente mais de 2 bilhões de toneladas métricas de resíduos sejam gerados globalmente (TISEO, 2023) e este número continua a aumentar de forma massiva em grande parte dos países ao redor mundo, segundo dados divulgados em 2021: Estados Unidos (265,2 milhões Mt/ano), China (215,2 milhões Mt/ano), Alemanha (53,7 milhões Mt/ano), Japão (41,7 milhões Mt/ano), França (38 milhões Mt/ano), Turquia (34,6 milhões Mt/ano), Reino Unido (31 milhões Mt/ano), Itália (28,9 milhões Mt/ano), Coreia do Sul (22,5 milhões Mt/ano), Espanha (22,4 milhões Mt/ano), Polônia (13,7 milhões Mt/ano), Austrália (12,6 milhões Mt/ano), Colômbia (12,1 milhões Mt/ano), Holanda (9 milhões Mt/ano), Chile (8,2 milhões Mt/ano), Israel (6,2 milhões Mt/ano), Nova Zelândia (3,7 milhões Mt/ano) e Costa Rica (1,6 milhões Mt/ano) (ALVES, 2023a).

Com o surgimento de volumes tão imensos de resíduos, a necessidade de as autoridades fornecerem serviços adequados de tratamento e descarte de resíduos tornou-se cada vez mais importante. No entanto, menos de 20% dos resíduos são reciclados a cada ano, com grandes quantidades ainda sendo enviadas para aterros sanitários. Os resíduos também são frequentemente descartados em locais perigosos de despejo a céu aberto, especialmente em países em desenvolvimento. Os países mais ricos produzem mais resíduos do que os países mais pobres, mas geralmente têm uma melhor gestão deles para ajudar a lidar com esses problemas. A menos que sejam tomadas medidas urgentes em várias frentes da gestão de resíduos, as taxas globais de geração de resíduos podem aumentar drasticamente até 2050 (ALVES, 2023b).

2.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são estabelecidos como englobando duas categorias de resíduos segundo suas origens de acordo a Política Nacional de Resíduos Sólidos instituída pela Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010):

a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;

b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;

c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;

O mundo gera 0,74 quilos de resíduos per capita por dia, mas as taxas de geração de resíduos variam amplamente de 0,11 a 4,54 quilos per capita por dia entre diversas nações. Os volumes de geração de resíduos são geralmente correlacionados com níveis de renda e taxas de urbanização e espera-se que até 2050 sejam gerados 3,40 bilhões de toneladas por ano no mundo. Espera-se que a quantidade total de resíduos gerados em países de baixa renda aumente mais de três vezes até 2050. Alimentos e resíduos verdes compreendem mais de 50% dos resíduos em países de baixa e média renda. Em países de alta renda, a quantidade de resíduos orgânicos é comparável em termos absolutos, mas, devido às maiores quantidades de resíduos de embalagens e outros resíduos não orgânicos, a fração de orgânicos é de cerca de 32% (KAZA et al., 2018).

Globalmente, cerca de 37% dos resíduos são descartados em algum tipo de aterro sanitário, 33% são despejados a céu aberto, 19% passam por recuperação de materiais por meio de reciclagem e compostagem e 11% são tratados por incineração moderna. A disposição ou tratamento adequado de resíduos usando aterros controlados ou instalações operadas com mais rigor é quase exclusivamente de domínio de países de renda alta e média-alta. Os países de baixa renda geralmente dependem do lixão a céu aberto – 93% dos resíduos são despejados em países de baixa renda e apenas 2% em países de alta renda. Os países de renda média alta praticam a maior porcentagem de aterros sanitários, com 54%. Essa taxa diminui em países de alta renda para 39%, onde 35% dos resíduos são direcionados para reciclagem e compostagem e 22% para incineração (KAZA et al., 2018).

No Brasil, a geração de resíduos sólidos urbanos ao longo de 2022 atingiu um valor estimado de 81,8 milhões de toneladas métricas, correspondendo a valor diário de 224,1 mil toneladas métricas. Sendo assim, cada brasileiro produziu uma média de 1,043 kg/dia de resíduos. A região com maior geração de resíduos é Sudeste, com cerca de 111 mil toneladas diárias (responsável por quase metade da geração do país) e uma média de 450 kg/hab.ano, enquanto a região Centro-Oeste é a menor entre as regiões do país, representando entre 7-8% do total gerado, aproximadamente 6 milhões de toneladas/ano. Quanto a geração per capita diária, as variações são evidentes, sendo a região Sudeste com maior valor médio, 1,234 kg/cap/dia, e a região Sul apresentando o menor valor médio, 0,776 kg/cap/dia (ABRELPE - ASSOCIAÇÃO

BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2023).

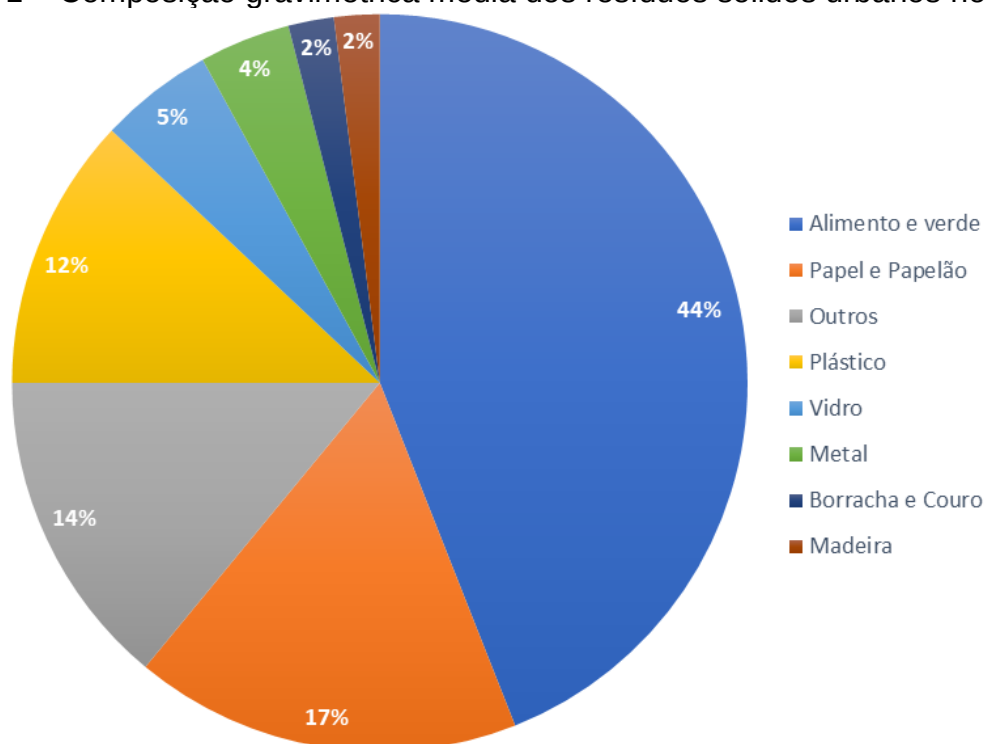
Dados consolidados em 2022 apontam que no Brasil ainda 39% (29,7 milhões de toneladas métricas) dos resíduos sólidos urbanos coletados têm destinação final inadequada, sinalizando uma queda em 0,5% em relação a 2021, sendo que essas áreas de disposição inadequada, que incluem lixões e aterros controlados, seguem em operação em todas as regiões, contudo a maior parte deles, que representam 61% (46,4 milhões de toneladas métricas), continua sendo encaminhada para destinação ambientalmente adequada, os aterros sanitários (ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2023).

2.1.1.1 Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos

A composição dos resíduos é a categorização dos tipos de materiais nos resíduos sólidos urbanos. A nível internacional, a maior categoria de resíduos são os resíduos alimentares e verdes, totalizando 44% dos resíduos globais, enquanto a menor parcela é representada pelas categorias borracha e couro que representa 2% dos resíduos e madeira que também representa o mesmo percentual de 2% (KAZA et al., 2018), como pode ser visto na Figura 1.

A composição dos resíduos varia consideravelmente de acordo com o nível de renda. A porcentagem de matéria orgânica nos resíduos diminui à medida que os níveis de renda aumentam. Os bens de consumo nos países de renda mais alta incluem mais materiais como papel e plástico do que nos países de renda mais baixa (KAZA et al., 2018).

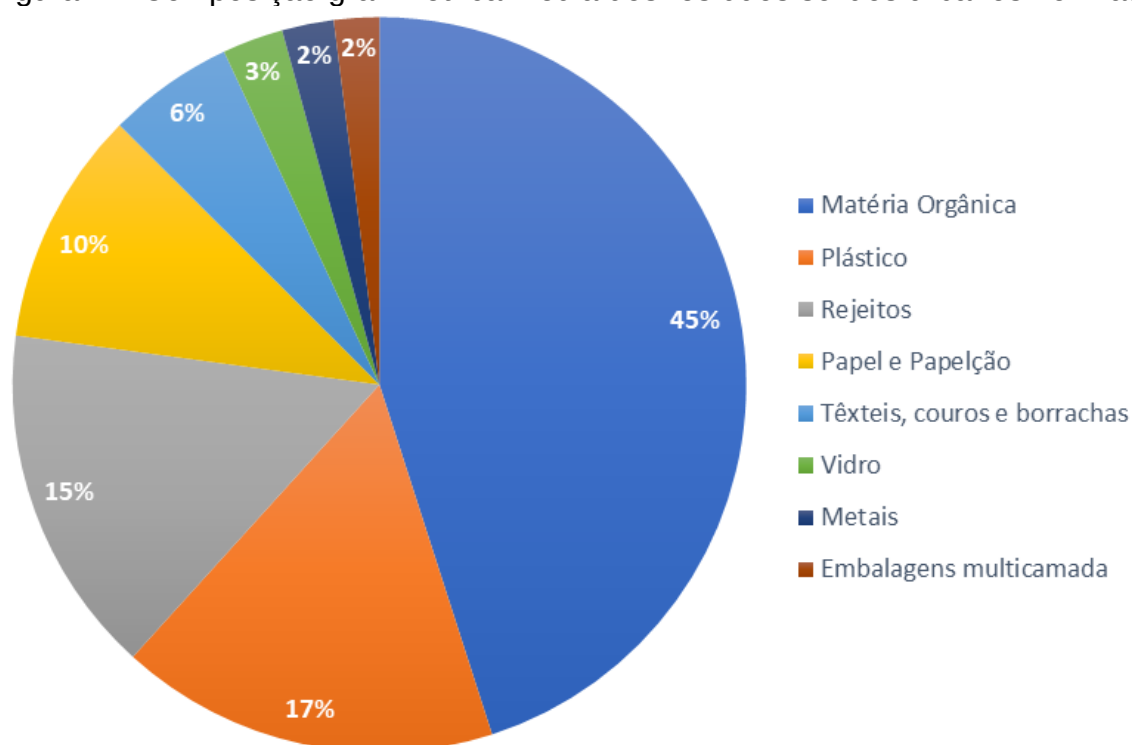
Figura 1 – Composição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos no mundo



Fonte: Elaboração própria baseado em Kaza et al. (2018).

No Brasil, percebe-se que há uma tendência semelhante quanto a composição dos resíduos a nível mundial, sendo a sua maior fração também composta por matéria orgânica, englobando sobras e perdas de alimentos, resíduos verdes e madeiras, que resultam em um valor aproximado de 46%, já a menor parte está relacionada aos metais equivalendo a pouco mais de 2%, um valor não muito distante também da média mundial. A classe de rejeitos é composta principalmente por resíduos sanitários e representam um cerca de 15% do total (BRASIL, 2022), como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Composição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos no Brasil



Fonte: Elaboração própria baseado em Brasil (2022).

2.1.2 Resíduos dos Serviços Públicos de Saneamento Básico

Os resíduos dos serviços públicos de saneamento básico (RSB) são compreendidos como os gerados nessas atividades, excluindo os resíduos já incluídos na classe determinada como “resíduos sólidos urbanos”, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos instituída pela Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010).

Os resíduos gerados em estação de tratamento de efluentes (ETE) são aqueles retirados das fases físicas de gradeamento e desarenamento, como também o lodo resultante do tratamento químico. Já em estação de tratamento de água (ETA) os resíduos são provenientes do gradeamento, do processo de clarificação da água, da decarbonização e o próprio carvão ativado da filtração, como consta na lista brasileira de resíduos da Instrução Normativa 13, de 18 de dezembro de 2012 (IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE, 2012).

No Brasil, existe um grande déficit no tocante aos serviços de esgotamento sanitário, o que resulta em uma grande parte de esgotos não tratados ou com destinação inadequada, que por vezes acabam entrando em contato direto com corpos d'água, afetando a sua qualidade e causando um impacto negativo à saúde

pública e ao meio ambiente pelo desequilíbrio causado (ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017). Do fluxo de resíduos de serviços públicos de saneamento básico no Brasil, cerca de 43% são de esgoto e 57% são de água, dos quais o destino final dado a eles é em sua maioria para aterros sanitários, representando pouco mais que 59%, já pouco mais de 30% é submetido a algum tipo de tratamento e quase 11% ainda tem sua destinação para lixões ou processo de compostagem/uso em solo (SINIR - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS, 2021).

Atualmente, no Brasil, a média de lodo gerada é de 1,08 kg/cap/dia oriundos das estações de tratamento de água (ETA) e esgoto (ETE), sendo majoritariamente o volume de resíduos vindos de serviço de água (97%), isso decorre não apenas por conta das características do sistema de água em relação ao de esgoto, mas também pela sua cobertura no território nacional – sendo que índice de atendimento de coleta de esgoto chega a pouco mais de 53% a nível Brasil (BRASIL, 2022).

Cada tipo de tratamento aplicado a águas e esgotos possui seus aspectos e métodos característicos que interferem diretamente na formação do lodo, sendo a produção do mesmo variável em relação ao tratamento adotado (BOTERO et al., 2009; FREDDO, 2014; LANGUER et al., 2020), sendo assim, não há uma caracterização e composição média precisa sem que haja uma amostra para ser analisada.

2.1.3 Resíduos de Óleos e Gorduras Vegetais

De acordo com a Resolução da Diretoria Colegiada N°481 (2021) feita pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) ficam definidos como óleos e gorduras vegetais:

I - gorduras vegetais: produtos constituídos principalmente de glicerídeos de ácidos graxos, podendo conter pequenas quantidades de outros lipídios, tais como fosfolipídeos, constituintes insaponificáveis e ácidos graxos livres naturalmente presentes no óleo ou na gordura, obtidos das partes das espécies vegetais listadas no Anexo I da Instrução Normativa - IN nº 87, de 15 de março de 2021, sólidos ou pastosos à temperatura de 25°C;

II - óleos e gorduras vegetais compostos: produtos obtidos a partir da mistura de:

- a) óleos ou gorduras vegetais, de duas ou mais espécies, podendo ser adicionados de especiarias ou outros ingredientes com finalidade de fornecer sabor, desde que não descaracterize o produto como óleo ou gordura; e
- b) óleos ou gordura vegetais, com adição de outros ingredientes com finalidade de fornecer sabor, desde que não descaracterize o produto como óleo ou gordura.

III - óleos e gorduras vegetais modificados: são os produtos obtidos a partir de óleos ou gorduras vegetais submetidos a fracionamento, hidrogenação, interesterificação ou outros processos físicos ou químicos seguros para produção de alimentos que visem modificar suas propriedades físicas e químicas originais, desde que não descaracterizem o produto como óleo ou gordura.

IV - óleos vegetais: produtos constituídos principalmente de glicerídeos de ácidos graxos, podendo conter pequenas quantidades de outros lipídios tais como fosfolipídeos, constituintes insaponificáveis e ácidos graxos livres naturalmente presentes no óleo ou na gordura, obtidos das partes das espécies vegetais listadas no Anexo I da Instrução Normativa - IN nº 87, de 15 de março de 2021, líquidos à temperatura de 25°C;

V - óleos vegetais prensados a frio: óleos vegetais obtidos exclusivamente por processos mecânicos sem aplicação de calor;

VI - óleos vegetais refinados: óleos vegetais submetidos a processos físicos ou químicos, visando principalmente a retirada dos ácidos graxos livres, pigmentos, traços de metais e compostos de oxidação, para obtenção de um óleo com características sensoriais desejáveis para o consumo; e

VII - óleos vegetais virgens: óleos vegetais obtidos exclusivamente por processos mecânicos e aplicação de calor, podendo ser submetido aos tratamentos de lavagem, decantação, centrifugação e filtração, desde que não altere a natureza do óleo.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos são classificados como resíduos perigosos aqueles que, em razão de suas características nocivas

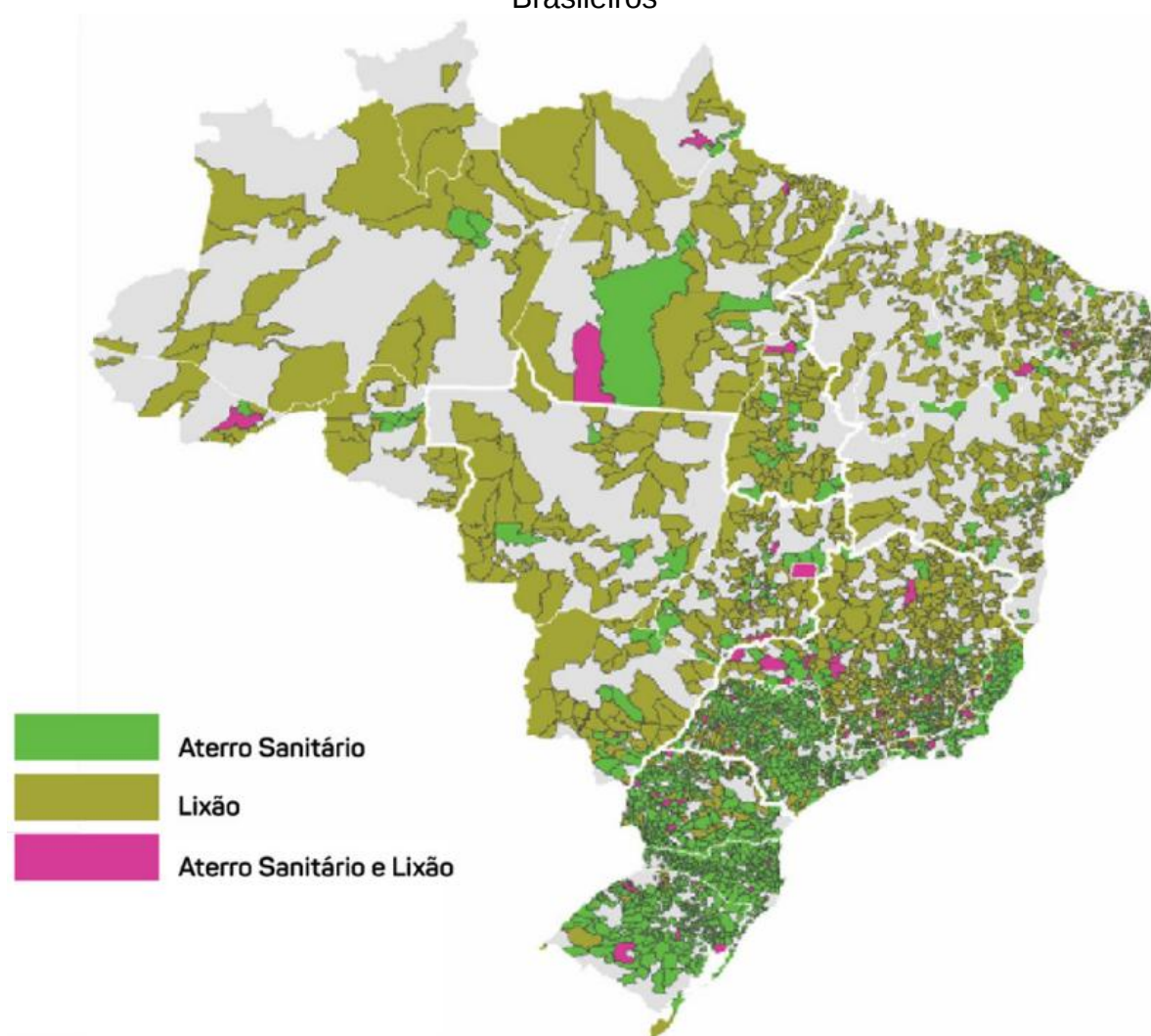
apresentem significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, fazendo com que os óleos e gorduras vegetais se enquadrassem nessa classificação, visto que eles são substâncias hidrofóbicas, ou seja, insolúveis em água, tornando-se, quando descartado de forma incorreta, um grande problema para a infraestrutura urbana de saneamento pois quando despejado no esgoto causa o entupimento das tubulações sendo necessário o uso de diversos produtos químicos para a desobstrução e também um grave poluente de águas, sendo estimado que um litro de óleo pode chegar a contaminar 20 mil litros de água (BRASIL, 2010).

O Brasil produz o volume aproximado de 9 bilhões de litros/ano de óleo vegetal, dos quais 33% são direcionados para o consumo humano, geralmente sendo utilizados em residências e estabelecimentos comerciais, com um consumo de 20 L/capita/ano ou 1,67 L/capita/mês (AGUIAR et al., 2022).

2.1.4 Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos

Um grande impasse na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos é a disposição final que fica definida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) como distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. Contudo, até 2019, 53,9% dos municípios brasileiros adotavam aterros controlados e/ou lixões como forma de disposição final, as quais são inadequadas e prejudiciais ao meio ambiente, os 46,1% restantes fazem sua disposição final em aterros sanitários, a qual é entendida mediante a lei como a disposição final ambientalmente correta (BRASIL, 2022), podendo ser observado na Figura 3. No Brasil até 2018, haviam ativos pouco mais de 600 aterros sanitários, enquanto os números para aterros controlados chegavam a entorno de 580 e de lixões próximo de 1.050.

Figura 3 – Disposição de resíduos sólidos urbanos adotada nos municípios Brasileiros



Fonte: Brasil (2022).

Desde 2012, quando houve a publicação da versão preliminar do Plano Nacional de Resíduos Sólidos até a publicação da versão oficial em 2020, a disposição final dos resíduos sólidos urbanos, apesar de ter avançado positivamente entre os cenários, ainda precisa de grandes avanços e melhorias em sua gestão. Das recomendações propostas na versão preliminar para que pudesse ser atingida um nível ambientalmente correto na disposição final dos resíduos que foram a erradicação dos lixões e a construção de aterros sanitários por municípios para que pudesse encerrar a atividade dos aterros controlados, nenhuma delas foram concretizadas (BRASIL, 2012), fazendo com que alternativas surjam a fim de cooperar na resolução de tal problema.

2.2 Tecnologias para Processamento de Resíduos Urbanos e Sua Conversão em Energia

As tecnologias de processamento de conversão de resíduos visando a geração e/ou recuperação de energia são aplicadas como tratamentos eficazes de resíduos sólidos urbanos, ao mesmo tempo em que dão origem à valorização energética (PALACIO et al., 2019). Esses métodos buscam atingir três principais objetivos:

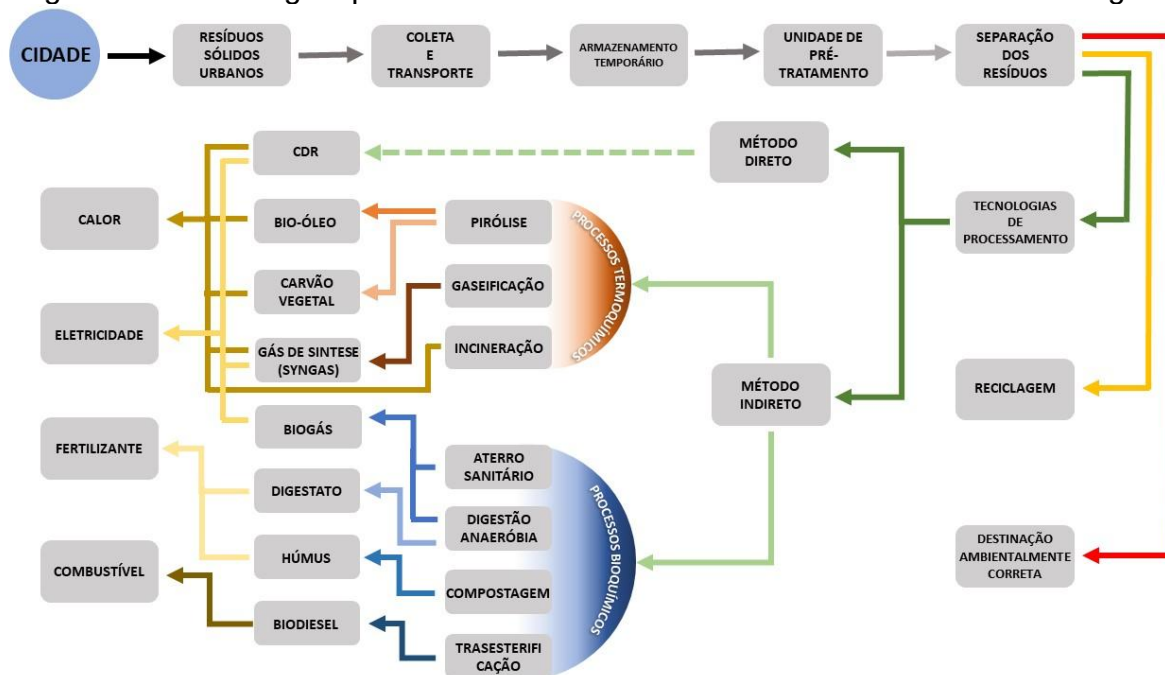
- A redução do volume total de resíduos sólidos urbanos a serem dispostos em aterros, independentemente de ser proveniente dos setores residencial e comercial;
- A minimização das porções orgânicas presentes nos resíduos sólidos urbanos, evitando a poluição ambiental secundária com metano sem controle de possíveis decomposições dos biodegradáveis eventualmente remanescentes após o tratamento;
- Evidenciar e valorizar o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos não recicláveis na forma de eletricidade e/ou calor.

Considerando as tecnologias, a recuperação de energia por meio de processos de conversão de resíduos sólidos pode ser obtida de forma direta ou indireta. As tecnologias diretas implementam a combustão direta de combustível derivado de lixo e outros resíduos, enquanto os caminhos de processamento indireto envolvem etapas de pré-tratamento antes da geração de energia - tanto processos de conversão termoquímicos como a incineração, pirólise, gaseificação e carbonização hidrotermal, quanto os de conversão bioquímica como a compostagem, digestão anaeróbia, aterro, conversão biológica em bioetanol e biodiesel (exemplo da transesterificação). Alguns dos produtos resultantes podem ser tecnicamente usado para geração de energia, seja ela elétrica e/ou calor, e também como combustível (HOANG et al., 2022).

Na Figura 4 pode-se observar a rota percorrida pelos resíduos sólidos desde a sua geração até a chegada na unidade de pré-tratamento onde ocorrer a separação dos materiais e onde cada tipo é encaminhado seja para processamento, reciclagem ou destinação ambientalmente correta, para os materiais que não tiveram as

possibilidades de outros tratamentos esgotadas. Os materiais encaminhados para o processamento podem passar por método direto ou indireto, como citado acima, a fim de que seu produto final seja aplicado para geração de energia.

Figura 4 – Tecnologias para conversão de resíduos sólidos urbanos em energia



Fonte: Elaboração própria baseado em Hoang *et al.* (2022).

2.2.1 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia depende das atividades dos micróbios para a degradação dos RSU, que, no entanto, é estritamente realizada sob condição anóxica (ABRAHAM *et al.*, 2021) e o seu processo produz principalmente biogás rico em metano e digestato, sendo esse último um o subproduto do processo, podendo ser aplicado como biofertilizante (KIYASUDEEN *et al.*, 2016). Os processos de digestão anaeróbia convencionais, sem pré-tratamento, que dependem do tratamento de lodo posteriormente resultam em baixa eficiência de custo de energia devido à duração prolongada necessária para a realização da digestão completa (ZAMRI *et al.*, 2021) e quando há o pré-tratamento do substrato geralmente resultam em ganhos significativos de energia. Diferentes métodos podem ser propostos para o pré-tratamento, por técnicas de meios mecânicos, químicos, biológicos e físico-químicos, a fim de aumentar a produção de biogás/metano e a geração global de energia mais alta (ALI *et al.*, 2018). Apesar disso, a digestão anaeróbia típica tem um nível de

intensidade de energia menor em comparação com outros métodos de tratamento de resíduos, dado a esse fato, ao invés de se produzir energia sozinha, fazer uso também do rendimento potencial de digestato como fertilizante e biogás combustível para produção de eletricidade (KUMAR; SAMADDER, 2020). Além disso, a alta versatilidade da digestão anaeróbia também permite o processamento de uma ampla gama de resíduos orgânicos e biomassa (NESHAT et al., 2017).

Na ausência de oxigênio, a digestão anaeróbia de RSU pode ser tentada sobre os micróbios mesófilos e termófilos, degradando a porção orgânica em biogás e digestato sólido. Embora o CH_4 represente uma porção significativa do biogás, entre 55–75%, outros componentes do gás também estão presentes na mistura: 30–45% CO_2 , 1–2% H_2S , 0–1% N_2 , 0–1% H_2 (HILKIAH IGONI et al., 2008). Os quatro principais mecanismos pelos quais ocorre a conversão de RSU orgânico são hidrólise, fermentação, acetogênese e metanogênese (JAIN et al., 2015).

A eficiência energética e o desempenho do processo de digestão anaeróbia depende da composição da matéria-prima orgânica e de várias condições operacionais críticas, como taxa de carga orgânica, teor de nutrientes no sentido da relação carbono-nitrogênio, nível de pH, temperatura, teor de umidade, e tempo de retenção. Com as configurações operacionais ideais, a produção de energia de 9 a 13,5 kgoe/tMSW orgânico pode ser alcançada (KANG; YUAN, 2017).

Em geral, a maioria dos digestores anaeróbicos podem produzir produção líquida de energia positiva. O processo de digestão anaeróbia é amplamente considerado como fonte de energia em várias indústrias (NG et al., 2019) e, de forma global, o processo fornece uma maior saída de energia líquida tendo sua escala menor, por facilitar o controle (LUO et al., 2020) e ele requer pré-requisitos mínimos de automação e tecnicidade, sendo, portanto, de baixo custo para sua operação e mais acessível para a maioria das indústrias. Seus altos níveis de prontidão social, comercial e tecnológica defenderam ainda mais sua adoção na prática (RYUE et al., 2020). Por outro lado, ainda existem vários desafios para a implementação da digestão anaeróbia de RSU. Embora os custos operacionais sejam atraentes, o investimento de capital inicial para digestores de grande escala é alto. Além disso, vários componentes tóxicos, como metais pesados, podem não ser consumidos no processo, e tratamento secundário e descarte ainda são necessários após a DA (KARKI et al., 2021).

Resumidamente, o processo de digestão anaeróbia continua mantendo-se atrativo por seus custos técnicos e operacionais geralmente baixos, bem como seu atributo ambientalmente sustentável que converte resíduos em energia. Os avanços pertinentes na área melhoraram significativamente o seu processo, levando ao aumento de sua implementação em várias indústrias em escala global. No entanto, os custos associados ao armazenamento e manuseio do digestato são atualmente questões importantes a serem otimizadas. A eventual aplicação de pré-aeração (AHN et al., 2014) pode aumentar a produção de metano, mas também acarreta um alto custo de uso de energia.

2.2.1.1 Tipos de biodigestores

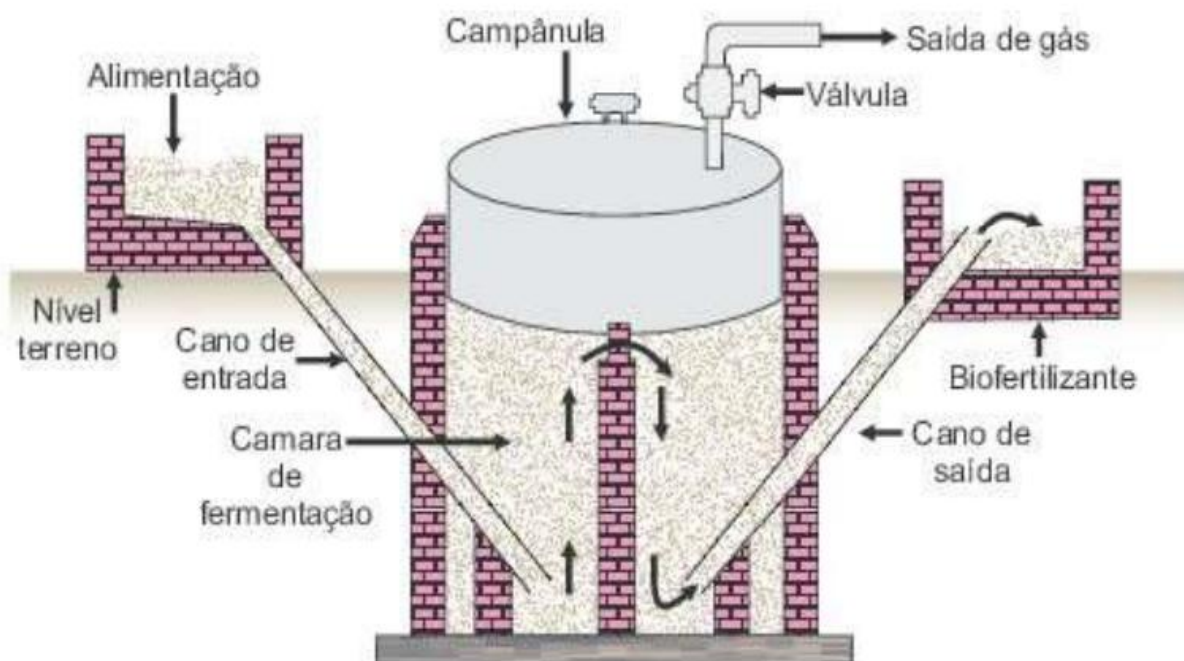
Os biodigestores podem ser categorizados em dois tipos: descontínuos e contínuo. Os biodigestores descontínuos são específicos para biomassas de lenta decomposição, nos quais é recebida a carga total de biomassa de uma única vez e sendo retida até o final do processo de biodigestão, quando então o biodigestor é esvaziado por completo para que assim um novo processo possa dar início. Já os biodigestores contínuos se adaptam a maioria das biomassas, podendo receber cargas de biomassa de forma diária ou periódica, onde o biofertilizante também pode ser coletado de forma contínua e eles também são os mais difundidos e conhecidos, sendo o modelo indiano, chinês e canadense, os que mais se destacam para grandes volumes resíduos e o modelo canadense sendo considerado o mais avançado e moderno em tecnologia, mesmo mantendo uma construção simples (CESTONARO DO AMARAL; RADIS STEINMETZ; KUNZ, 2019a; ELIF GULSEN AKBAY, 2024; OTENIO, 2016).

2.2.1.1.1 Modelo Indiano

O biodigestor de modelo indiano é uma tecnologia que tem sido empregada por mais de quatro décadas, principalmente em ambientes rurais. Sua estrutura é construída em alvenaria, com um revestimento impermeabilizante, adotando a forma cilíndrica na orientação vertical. O biodigestor é composto por uma divisória central que separa o tanque onde ocorre o processo de fermentação. Uma tubulação é destinada à entrada do substrato para a fermentação, enquanto outra tubulação é

responsável pela saída dos produtos após a conclusão do processo. Além disso, esse modelo incorpora um gasômetro localizado na superfície da estrutura (CALZA et al., 2015). Na Figura 5 pode-se observar o esquema de um biodigestor de modelo indiano o qual tem uma parte dedicada a alimentação onde o substrato é colocado e depois vai para a câmara de fermentação onde ocorre o processo anaeróbio para formação do biogás e o biofertilizante que vai para um outro compartimento.

Figura 5 – Biodigestor de modelo indiano

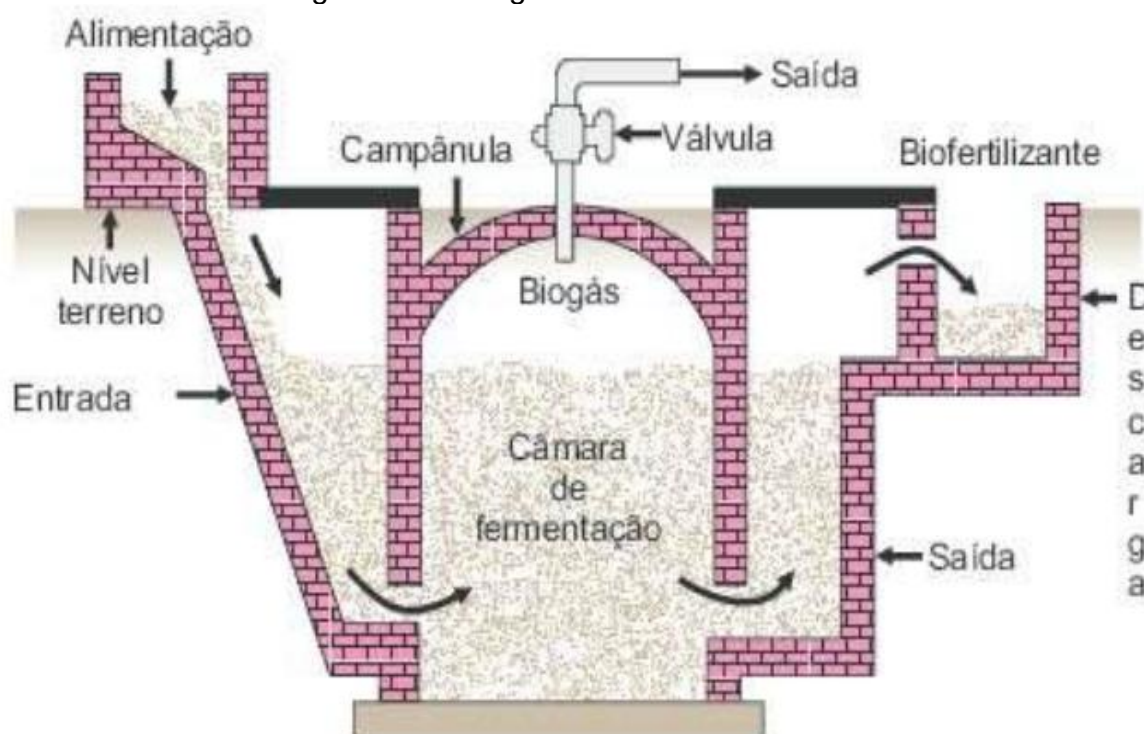


Fonte: Adaptado de Fonseca, Araújo e Hendges (2009).

2.2.1.1.2 Modelo Chinês

O modelo chinês de biodigestor é derivado do modelo indiano, com ênfase na busca por adaptações de natureza econômica. Como resultado dessa abordagem, o modelo chinês opta por não incorporar um gasômetro, uma vez que este componente representa uma parcela significativa dos custos totais do modelo indiano. A ausência do gasômetro pode, no entanto, resultar em vazamentos de biogás, a menos que haja uma vedação adequada. A construção do biodigestor chinês é similar à do modelo indiano, mantendo a estrutura principal em alvenaria, como pode ser observado na Figura 6 (DEGANUTTI et al., 2002).

Figura 6 – Biodigestor de modelo chinês

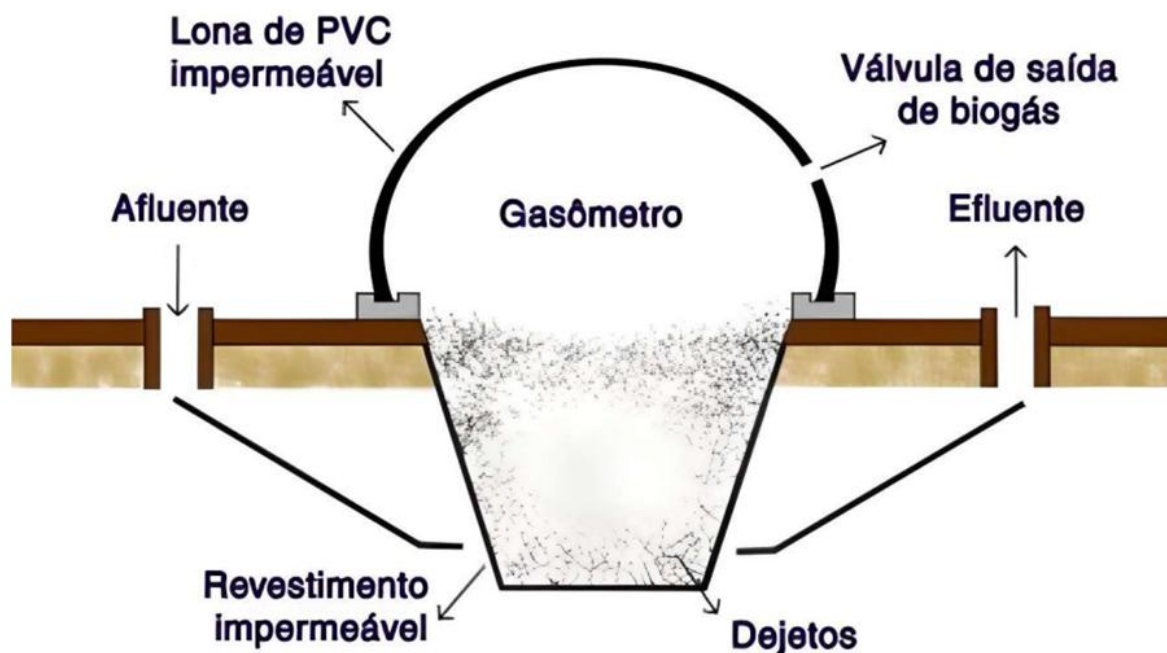


Fonte: Adaptado de Fonseca, Araújo e Hendges (2009).

2.2.1.1.3 Modelo Canadense

O biodigestor de modelo canadense apresenta uma configuração retangular, caracterizada por uma largura superior à profundidade, proporcionando uma maior exposição solar. Essa configuração visa otimizar o aumento de temperatura e, por conseguinte, a eficiência do processo de digestão anaeróbia. Sua estrutura é construída em alvenaria e revestida com uma geomembrana sintética, que pode ser confeccionada em materiais como PEAD, PVC, e outros, com a finalidade de impermeabilização. Além disso, o modelo canadense inclui um gasômetro composto por uma lona de PVC flexível, a qual é fixada ao redor do perímetro do biodigestor e é inflada conforme a produção de biogás ocorre, como está demonstrado na Figura 7.

Figura 7 – Biodigestor de modelo canadense



Fonte: Cestonaro do Amaral, Radis Steinmetz e Kunz (2019a).

2.2.1.2 Biogás

O biogás é uma mistura inflamável de gases que consiste principalmente pela presença de CH_4 numa concentração entre 50–75% e de CO_2 entre 25–50%, podendo ainda apresentar resquícios não tão significativos de N_2 entre 0-10% e H_2 , H_2S e O_2 entre 0-3% cada (LYTRAS et al., 2021; UDDIN et al., 2016), sendo produzido pela decomposição microbiana anaeróbica de matérias-primas de biomassa, como estrume, resíduos agrícolas, resíduos urbanos, desperdício de alimentos, esgoto etc (DIVYA; GOPINATH; MERLIN CHRISTY, 2015) como pode ser visto na Tabela 2. O seu processo de produção ocorre em reator fechado, seja biodigestor, digestor anaeróbico ou biorreator, ou também em aterro. Porém, neste último caso, o biogás de aterro apresenta uma qualidade inferior (BHATIA, 2014).

Tabela 2 – Produção de biogás a partir de diferentes substratos orgânicos sólidos

Substrato	Rendimento de biogás [L/kg.SV]
Palha de trigo	200-300
Resíduos agrícolas	310-430
Sistema de esgoto	310-740

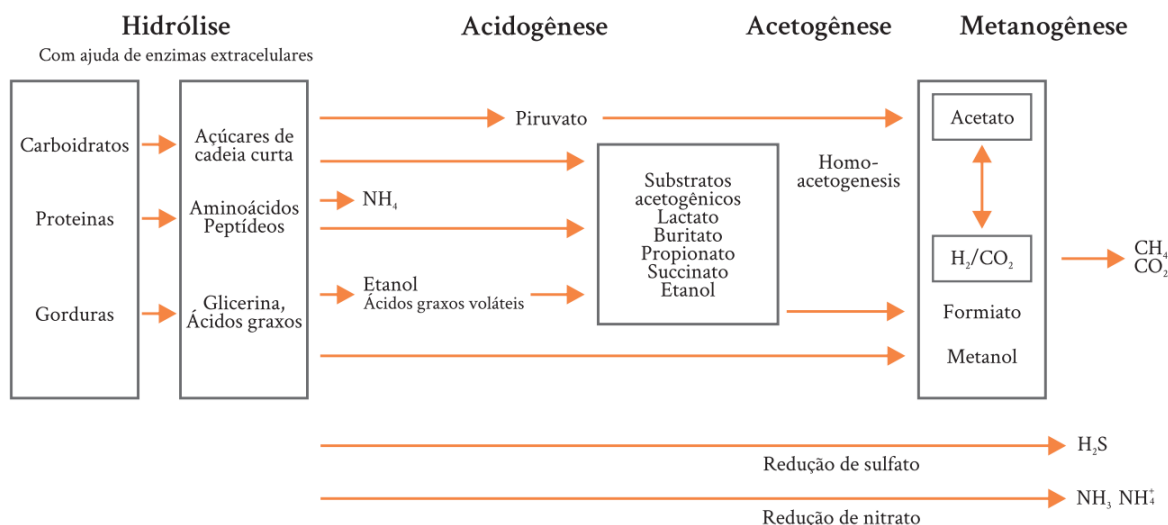
Folhas caídas	210-290
Algas	420-500
Resíduo vegetal	330-360
Linho	360
Topos de batata (verduras)	280-490
Excrementos de aves	310-620
Esterco de vaca	90-310
Resíduos sólidos municipais	200-530
Desperdício de comida	396
Lixo doméstico	350

Fonte: Adaptado de Uddin et al. (2016).

O biogás pode ser queimado para produzir energia e, portanto, atua como um combustível que pode ser utilizado para qualquer finalidade de queima, podendo ser utilizado na aplicação em motor a gás para produção de calor e eletricidade. Além disso, pode ser atualizado ao nível do gás natural, biometano >97% CH₄, que pode ser injetado na grade e também podendo ser comprimido (GNV) para uso como combustível de transporte (KALITA et al., 2017).

Ao contrário de outros biocombustíveis, como o bioetanol e o biodiesel, a produção de biogás através do processo de digestão anaeróbia é relativamente simples e é concluída em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Etapas do processo de produção de biogás através da digestão anaeróbia



Fonte: Cestonaro do Amaral, Radis Steinmetz e Kunz (2019b).

Durante a hidrólise, os grandes polímeros, como carboidratos, proteínas e gorduras, são decompostos em açúcares simples, aminoácidos e ácidos graxos, respectivamente. Anaeróbios que degradam carboidratos e produzem enzimas (SUN et al., 2016).

Os produtos após a hidrólise são posteriormente fermentados na acidogênese por micróbios fermentativos para produzir ácidos carbônicos, gás hidrogênio, gás sulfídrico, álcoois, CO_2 , ácidos graxos voláteis mais curtos, amônia e outros vestígios. No geral, esses produtos tornam o ambiente do digestor ácido. Os produtos da acidogênese são transformados em ácido acético/acetato na etapa de acetogênese por bactérias acetogênicas, como pode ser visto na Reação 1.



Produtos como acetato, gás carbônico, gás hidrogênio, butirato, propionato, lactato, succinato e álcoois das etapas anteriores da digestão anaeróbica são as substâncias dos metanógenos que produzem metano no estágio final da metanogênese. Os metanógenos são arqueas anaeróbicas obrigatórias. As vias de produção de metano, tais como aquelas que envolvem ácido acético e gás carbônico, são as seguintes Reações 2 e 3:

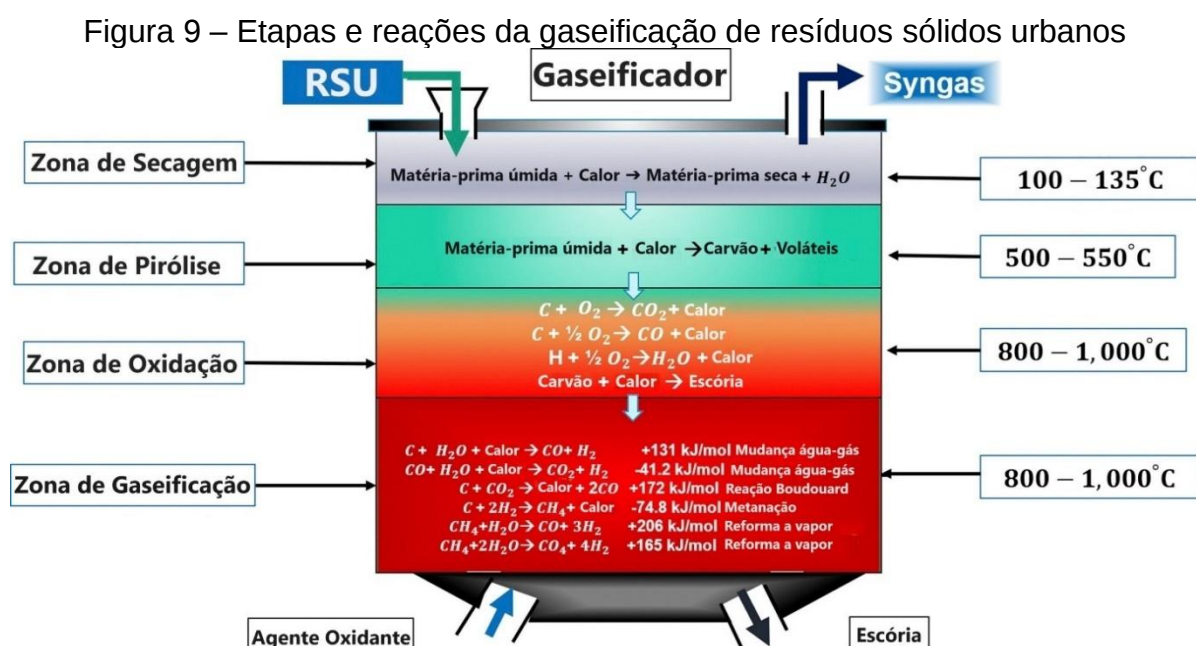




Visto que a co-digestão anaeróbia da fração orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos com lodo de esgoto apresenta resultado mais expressivo na produção de um biogás mais rico em metano em relação a mono-digestão da fração orgânica dos resíduos sólidos e lodo de esgoto (LEBIOCKA; PIOTROWICZ, 2012; TYAGI et al., 2018), sendo assim,

2.2.2 Gaseificação

A gaseificação é um método popular de tratamento de RSU que oferece a geração de calor e gás de síntese combustível que pode ser usado para geração de eletricidade (WEI et al., 2017). Normalmente, o gás de síntese contém (CHAN et al., 2019) principalmente hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO), ocasionalmente com traços de metano (CH_4) e a sua produção está relacionada geralmente às porções orgânicas dos RSU e de biomassa, que são suscetíveis à decomposição em alta temperatura. A gaseificação consiste em quatro etapas: secagem, pirólise, oxidação e zona de gaseificação (SEO; ALAM; YANG, 2018). Pode ser observado na Figura 9 o sistema de gaseificação.



Fonte: modificado a parte Seo, Alam e Yang (2018).

O conteúdo de energia medido a partir do gás de síntese é tipicamente entre 4 e 50 MJ/Nm³, aproximadamente um terço do gás natural convencional (CHAN et al., 2019). A produção de gás de síntese a partir de RSU é promissora, pois pode facilmente aproveitar a infraestrutura de gás natural existente para armazenamento, transporte e distribuição sem a necessidade de adaptação. Além disso, a recuperação de calor do fluxo de gás de síntese também é possível, já que a gaseificação é comumente realizada em altas temperaturas. Uma maior recuperação de energia pode ser obtida através da queima de gás de síntese em turbinas a gás e motores de combustão interna para geração de energia. A escória resultante do processo de gaseificação é principalmente inorgânica, que pode ser aplicada na construção de estradas. Em comparação com o método de incineração, a gaseificação é mais adequada para o processamento de RSU com uma porção inorgânica substancial (YONG et al., 2019). Além disso, também tem prevalecido pela variedade de seus produtos, que abrange calor, energia e outros combustíveis secundários. Para operações de menor escala, a integração de sistemas de gaseificadores e motores de combustão interna poderia proporcionar maior eficiência energética com emissões mínimas de poluentes (TEIXEIRA et al., 2014). Com a maturidade dessa tecnologia, as operadoras podem escolher entre uma ampla gama de gaseificadores, dependendo das características operacionais e desempenho desejados.

A intensificação da gaseificação, por exemplo, gaseificação integrada a plasma, é um tratamento de resíduos promissor (MUNIR et al., 2019). Nesse processo, raios de plasma em temperaturas extremamente altas de 2.000 a 14.000 °C são direcionados para o RSU (TAVARES; RAMOS; ROUBOA, 2019), o que leva a quatro processos sequenciais a seguir no RSU: secagem para remoção de umidade, pirólise em condição anóxica para liberação de voláteis, combustão do carvão residual com oxigênio para produção de energia e, finalmente, processo de redução para produção de gás de síntese (INDRAWAN et al., 2019).

Vários possíveis caminhos de conversão foram examinados por Mazzoni e Janajreh (2017) para produzir energia a partir de RSU e resíduos sólidos plásticos via gaseificação de plasma. O tratamento proposto rendeu 38% de eficiência energética a partir de matérias-primas mistas que continham 70% de RSU e 30% de resíduos sólidos plásticos, com oxigênio puro sendo empregado como gás de plasma. No entanto, a presença de vapor (cerca de 34%) é prejudicial ao desempenho de tal

processo, reduzindo sua eficiência energética para 21,7% com igual proporção de RSU e resíduos sólidos plásticos na matéria-prima (MAZZONI; JANAJREH, 2017).

A aplicação da gaseificação para tratamento de RSU apresenta diversos benefícios importantes. Notavelmente, uma alimentação controlada de oxigênio para o reator é importante para reduzir a geração de dioxinas nos gases de exaustão, como, por exemplo, óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x). Em comparação com os métodos de incineração e pirólise, a gaseificação gera maior energia líquida média de 36–63 kgoe/tMSW (SEO; ALAM; YANG, 2018), enquanto sua intensificação com plasma poderia aumentar ainda mais para 63–81 kgoe/t MSW (BYUN et al., 2012). Ao longo do processo de gaseificação, uma redução efetiva do volume de RSU, até 80-90%, também pode ser alcançada em conjectura para a produção de gás de síntese (MUNIR et al., 2021). Esse gás de síntese é útil para geração de eletricidade por meio da integração de uma turbina a gás ou módulos de células de combustível.

No entanto, existem aspectos negativos associados à produção de alcatrões, cinzas, material particulado e metais pesados durante o processo de gaseificação, por quanto essas substâncias tendem a se acumular dentro do gaseificador causando a deterioração do equipamento, além de serem consideradas nocivas ao meio ambiente. Cuidado especial deve ser dado às reações que operam a $>1.100^\circ\text{C}$, pois pode facilitar a formação de alcatrão, levando ao bloqueio do reator (LA VILLETТА; COSTA; MASSAROTTI, 2017). A limpeza periódica do gás pode ser uma estratégia útil para evitar o problema de bloqueio, removendo não apenas alcatrão, mas também os materiais particulados, metais pesados, ácido clorídrico e sulfato de hidrogênio, acumulados no reator (IRFAN et al., 2019).

Atualmente, a gaseificação de RSU ainda não atingiu prontidão social, comercial e tecnológica suficiente para uma aplicação mais ampla, principalmente devido às emissões de poluentes atmosféricos nocivos, como SO_x , CO e NO_x , juntamente com outros compostos orgânicos voláteis (VAISH et al., 2019). Medidas efetivas, como a utilização de equipamentos para captação e tratamento desses gases, devem ser tomadas para minimizar os danos causados por essas emissões nocivas. Além disso, os tratamentos pós-processamento para cinzas e outros resíduos tóxicos também desempenham papéis críticos na minimização dos impactos ambientais causados pelo descarte inadequado desses subprodutos (LUO et al., 2018).

A tecnologia de gaseificação, aplicada aos resíduos, precisa de melhorias adicionais – incluindo uma seleção adequada do agente gaseificante como o oxigênio, vapor d'água ou ar (ADNAN; HOSSAIN; GOLAM KIBRIA, 2022), que influencia significativamente o rendimento, a seletividade dos componentes e o poder calorífico do gás de síntese produzido.

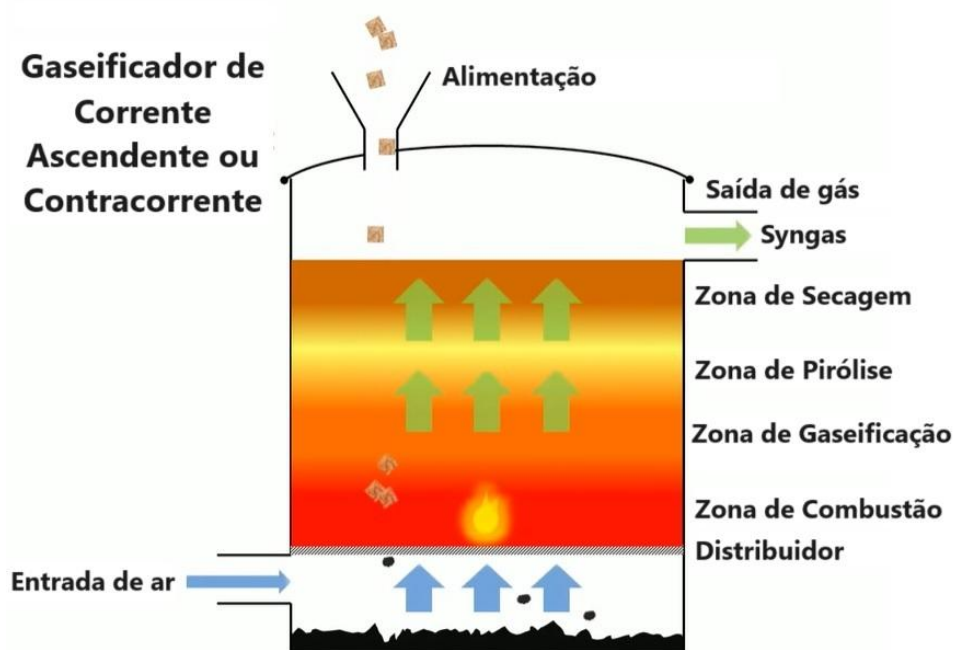
2.2.2.1 Tipos de Gaseificadores

Diferentes tipos de gaseificadores foram desenvolvidos em décadas e pesquisas e estudos em andamento buscam o aprimoramento dos gaseificadores. A grande parte destes estudos trabalharam com três tipos de gaseificadores: leito fixo, leito fluidizado e leito de fluxo arrastado (SURYAWANSHI et al., 2023; YU et al., 2016).

2.2.2.1.1 Gaseificador de leito fixo

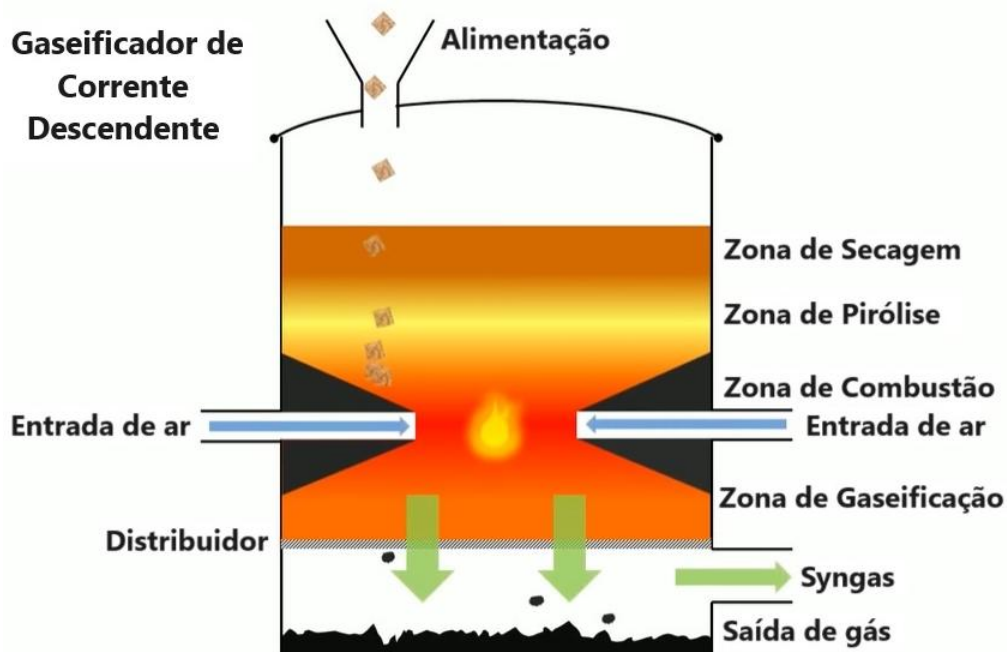
Os gaseificadores de leito fixo são a tecnologia de gaseificação mais simples processada por um sistema lento. Utiliza agentes oxidantes e tem um longo tempo de residência, aproximadamente 900–1800 segundos em alta pressão (MATERAZZI et al., 2013). O sistema de movimento lento tem a forma de um cilindro com espaço onde a matéria-prima é alimentada na parte superior do reator enquanto o agente de gaseificação é adicionado na parte inferior. O reator se move lentamente com alta pressão entre 1 e 100 bar e fornecendo temperatura entre 500 a 1200°C, resultando em alta conversão de carbono (NUAMAH et al., 2012). Os gaseificadores de leito fixo incluem reatores de corrente ascendente e descendente que diferencia na configuração do reator, como pode ser observado nas Figuras 10 e 11, respectivamente, os quais possuem zonas de secagem, pirólise, gaseificação e combustão, tendo apenas as saídas de gás posicionadas em locais diferentes.

Figura 10 – Esquema de gaseificador de leito fixo de corrente ascendente



Fonte: Adaptado de Biofuels Edu (2013).

Figura 11 – Esquema de gaseificador de leito fixo de corrente descendente



Fonte: Adaptado de Biofuels Edu (2013).

Na gaseificação convencional ou em um gaseificador de corrente ascendente, o RSU é inserido na parte superior do gaseificador, enquanto os agentes oxidantes são introduzidos na lateral ou na parte inferior do reator (CHOPRA; JAIN., 2007). A produção de gás de síntese é movida para cima através do reator e entregue no nível

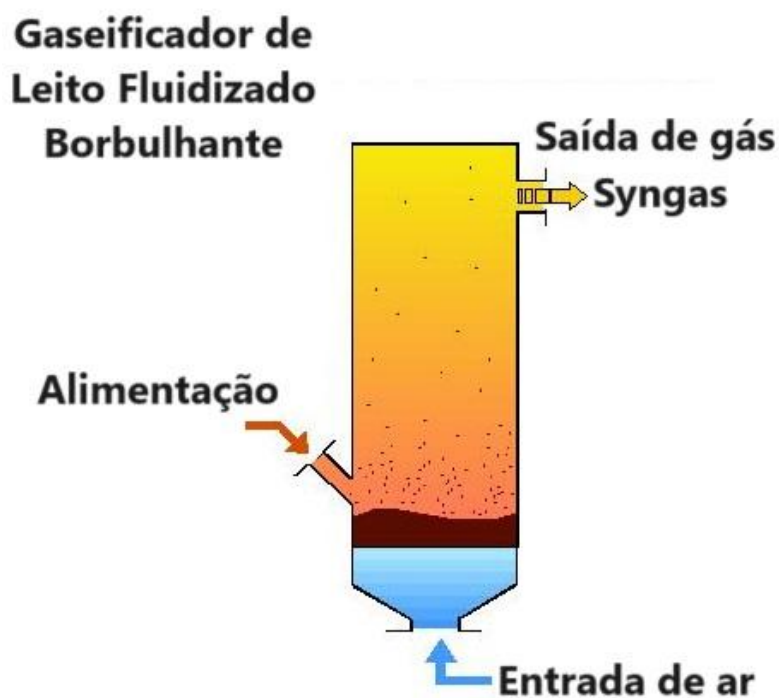
mais alto do leito, enquanto as cinzas são descartadas no fundo. No reator *de corrente descendente*, a matéria-prima também entra pelo topo do reator, entretanto, os agentes de gaseificação entram pela lateral ou topo do gaseificador. Além disso, o gás de síntese é movido para baixo no fundo do leito (PUIG-ARNAVAT; BRUNO; CORONAS, 2010).

Estudos evidenciam que os reatores de leito fixo podem ser utilizados em diversos tipos de resíduos com alta conversão e baixa emissão de cinzas (ARBITER et al., 2019; LUCAS, 2005). Contudo, os gaseificadores de leito fixo não são comumente empregados em larga escala devido à exigência de uma forma específica de matéria-prima com baixo teor de umidade, o que é um problema para o tipo de alimentação de RSU (HELSEN et al., 2010).

2.2.2.1.2 Gaseificador de leito fluidizado

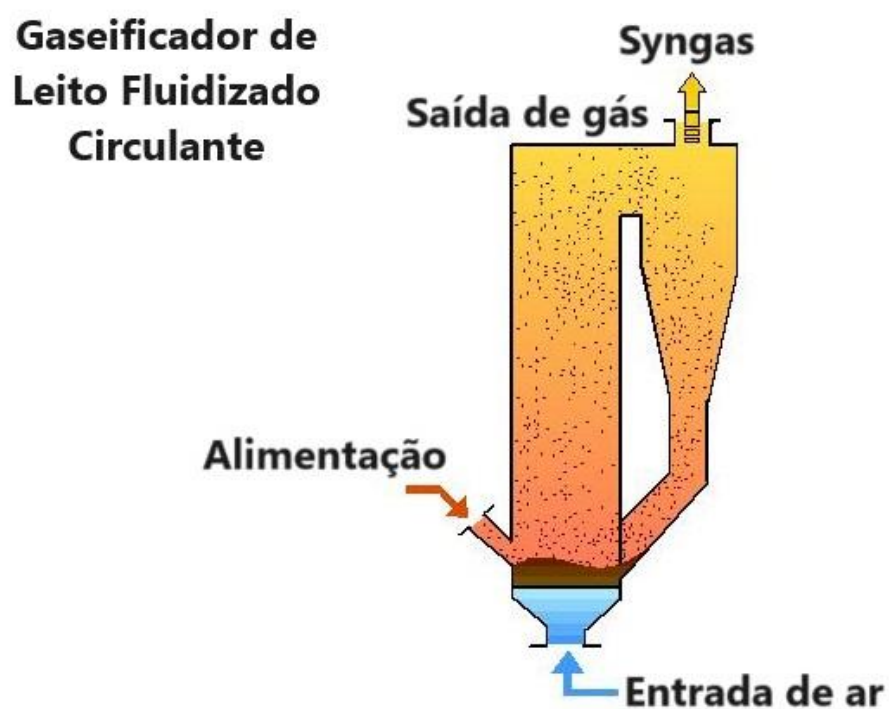
Muitos estudos examinaram principalmente que as aplicações de leito fluidizado são adequadas para gaseificação de RSU em termos de decomposição de vários tipos de RSU com alta taxa de transferência de calor que pode reter a temperatura uniforme no reator. Além disso, podem ser transformadas em centrais elétricas de grande escala (KIRNBAUER et al., 2012; NILSSON et al., 2014). Nos processos de leito fluidizado, o RSU é alimentado no reator e, então, o meio de fluidização (ar) é injetado junto com areia adicional para ativar a reação na temperatura operacional de cerca de 800–900°C. O calcário calcinado adicional pode levar ao aumento do desempenho do reator, aumentando a temperatura e o tempo de residência (TIMMER; BROWN, 2019). Os reatores de leito fluidizado contemporâneos podem manter a faixa de temperatura entre 700 e 1000°C e a matéria-prima pode gastar mais tempo durante a reação, o que resulta em alta transferência de calor e alta conversão de carbono (MATERAZZI et al., 2013). Atualmente, os gaseificadores de leito fluidizado podem ser agrupados em dois tipos principais, leito fluidizado borbulhante e leito fluidizado circulante, como demonstrado na Figura 12 e 13, respectivamente.

Figura 12 – Esquema de gaseificador de leito fluidizado borbulhante



Fonte: Adaptado de Boilers Info (2018).

Figura 13 – Esquema de gaseificador de leito fluidizado circulante



Fonte: Adaptado de Boilers Info (2018).

O gaseificador de leito fluidizado borbulhante é projetado para operar sob condições de baixa velocidade do gás entre 1 e 3 m/s e temperatura de operação entre 800 e 1000°C (ARENA, 2012). As partículas são movidas com o gás que pode

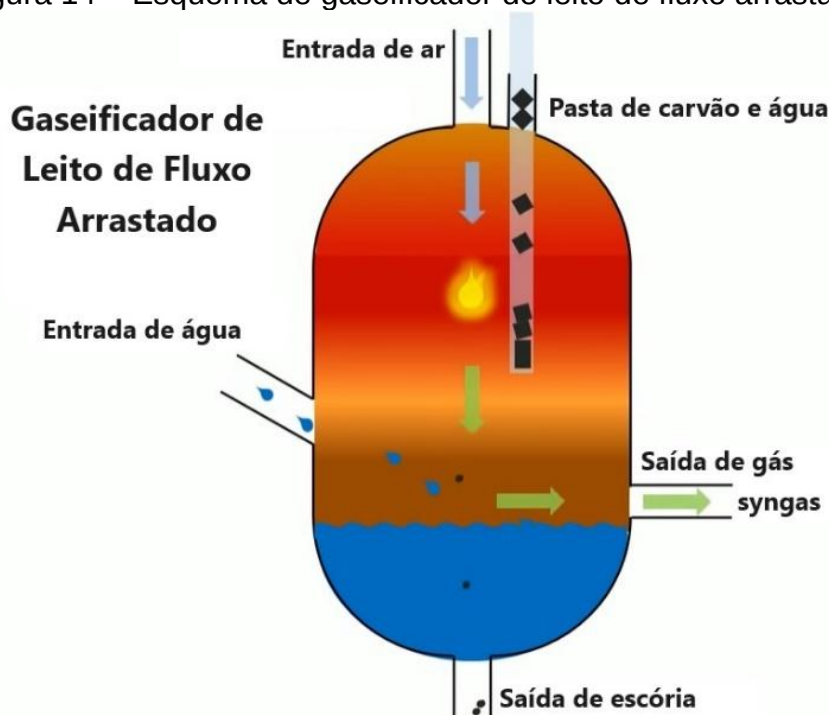
ser dividido em um ciclone, de modo que o gás de síntese bruto flui para o próximo estágio enquanto essas partículas podem cair no fundo. No gaseificador de leito fluidizado circulante, existem duas etapas deste reator; em primeiro lugar, a câmara de leito fluidizado borbulhante reage com o RSU para gerar gás de síntese e, no segundo estágio, a velocidade mais alta do gás é geralmente fornecida entre 3 e 10 m/s para arrastar o sólido. Finalmente, o ciclone permite que as partículas sólidas se separem e recirculem na câmara do leito fluidizado (SANSANIWAL et al., 2017). Consequentemente, os gaseificadores de leito fluidizado são comumente usados para matéria-prima de RSU em larga escala devido ao seu bom desempenho.

2.2.2.1.3 Gaseificador de leito de fluxo arrastado

Esta tecnologia é empregada comercialmente em plantas e indústrias químicas com ciclo de gaseificação integrado (GUO et al., 2007). O conceito deste reator mostrado na Figura 14 é combinar a matéria-prima com água para aumentar a eficiência energética. Em geral, o gaseificador de leito de fluxo arrastado é operado por alta temperatura entre 1200-1500°C e alta pressão entre 20 e 80 bar, mas algumas partículas permanecem no leito durante um curto tempo de residência (CHHITI; PEYROT; SALVADOR, 2013).

Dentre os modelos apresentados, o selecionado para esse trabalho foi o gaseificador de leito fluidizado por apresentar vantagens como ter uma operação simples, boa capacidade de combustão de resíduos heterogêneos e baixos custos de manutenção, entre outros, e apresentando menos desvantagens em relação aos outros modelos (CHANTHAKETT et al., 2021).

Figura 14 – Esquema de gaseificador de leito de fluxo arrastado



Fonte: Adaptado de Biofuels Edu (2013).

2.2.2.2 Gás de Síntese

O gás de síntese é definido como um gás com H_2 e CO como principais componentes do combustível e visto que ele é normalmente utilizado a pressões mais elevadas para a síntese de produtos químicos e combustíveis, o teor de N_2 deve normalmente ser minimizado (EL-NAGAR; GHANEM, 2019).

Em toda a indústria química, o gás de síntese é um produto intermediário substancial e todos os anos cerca de 6 EJ de gás de síntese são fabricados globalmente, chegando a representar aproximadamente 2% do consumo mundial atual de energia primária. A indústria de amônia domina o mercado a nível mundial de gás de síntese chegando a 53% do uso de todo gás de síntese fabricado (DÍAZ et al., 2014).

Diferentes características do gás de síntese podem afetar o processo de combustão em motores de combustão interna, sendo o limite de inflamabilidade uma das propriedades mais importantes na segurança do motor e no combustível e juntamente também a velocidade laminar da chama (velocidade de queima) por conta do funcionamento da câmara de combustão e seu desempenho em emissões (ESMAILI; MOSTAFAVI; MAHINPEY, 2016).

A composição do gás de síntese vai depender de diferentes variantes como da matéria-prima, tamanho do particulado, vazão do gás e fluxo da matéria-prima, configurações do reator químico, condições de operação ou processo de gaseificação, gaseificador e catalisador, e tempo de residência do gás, contudo, a temperatura do reator, que é afetada pelo valor da relação ar-combustível, é a variante que mais influenciará. Além disso, as concentrações de CO, H₂ e CH₄ no gás produzido também são controladas por reações químicas no processo de gaseificação (EL-NAGAR; GHANEM, 2019).

Por sua vez, há uma influência considerável no poder calorífico do gás de síntese no tipo de agente oxidante utilizado para gaseificação e seu poder calorífico normalmente não excede 6 MJ/Nm³ (JIANG et al., 2017). O gás de síntese tem sua composição típica de gaseificação de biomassa com o oxidante em concentrações aproximadas de: 15–20% de H₂, 15–20% de CO, 0,5–2% de CH₄, 10–15% de CO₂ e o restante do componente N₂, O₂ e C_xH_y (hidrocarbonetos). Se a concentração dos componentes do combustível for consideravelmente aumentada e o gás for denominado de valor calorífico médio, até 16 MJ/Nm³, onde se utiliza oxigênio ou vapor de água ou a mistura de ambos (BAHRI; VENEZIA; UPADHYAYULA, 2019).

2.2.3 Aplicação de Gases em Motor de Combustão Interna

Os motores de combustão interna surgiram pela primeira vez há 150 anos, quando Étienne Lenoir desenvolveu um motor com eficiência de 5% e utilizou um cilindro integrado a um pistão para queimar a mistura carvão-ar sem compressão. Posteriormente, Nicolaus A. Otto desenvolveu um motor aprimorado com o conceito de Lenoir com maior eficiência de 11%. Otto construiu o primeiro motor baseado no conceito de quatro tempos, que serve como ciclo de operação principal nos motores atuais (CUMMINS, 1976). A partir deste estágio e com os esforços de alguns grandes desenvolvedores como Rudolf Diesel, Robert Bosch, Sir Harry Ricardo e Charles Kettering, o motor de combustão interna é agora um dos sistemas de energia energeticamente eficientes, econômicos, simples de operar e confiáveis acessíveis a pessoas (NADALETI et al., 2017a).

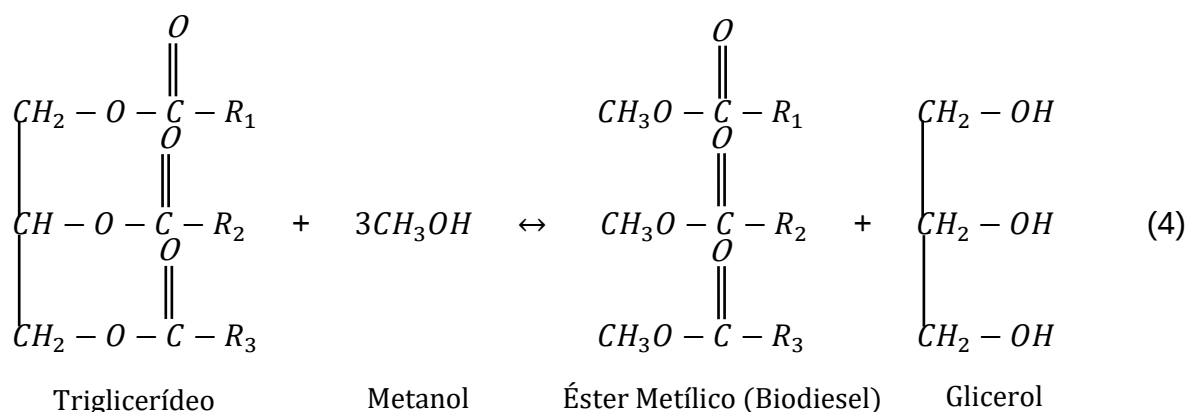
O motor de combustão interna é um tipo de motor térmico em que a energia química do combustível é transformada em energia mecânica com a ajuda da

combustão de combustível em alta pressão. Ele tem duas partes principais: uma é o cilindro estacionário e a segunda é o pistão, que é usado para comprimir a mistura de combustível e ar, provocando a combustão e produzindo gases de alta pressão e temperatura na câmara de combustão os quais aceleram o pistão fazendo a energia mecânica ser transferida para o eixo giratório (MALIK; AWASTHI, 2021).

A utilização de combustíveis alternativos em motores tornou-se objeto de interesse significativo devido às crescentes questões relacionadas à segurança ambiental e à escassez de petróleo bruto. O gás de síntese, GNV, GLP, biogás e hidrogênio foram identificados como combustíveis alternativos. Os combustíveis gasosos GNV e GLP são combustíveis à base de petróleo e amplamente acessíveis e eles são usados principalmente para aplicações de transporte, podendo o GNV também ser usado em aplicações industriais. Por outro lado, os combustíveis hidrogênio, gás de síntese e biogás são produzidos a partir de recursos renováveis, que são utilizados principalmente para a geração de energia visando um menor impacto ambiental em relação os combustível de origem fóssil (DE MELO FREIRE; SANTOS; ALMEIDA, 2020; NADALETI et al., 2017b).

2.2.4 Transesterificação

O método mais comumente utilizado para a síntese de biodiesel a partir de óleo de cozinha residual é a reação de transesterificação que é a reação entre o óleo utilizado como matéria-prima e o álcool na presença ou ausência de um catalisador. Os catalisadores, homogêneos ou heterogêneos, têm um efeito muito importante na qualidade do biodiesel produzido e no rendimento do biodiesel (MONIKA; BANGA; PATHAK, 2023), na Reação 4 pode-se observar o processo da transesterificação (LAM; LEE; MOHAMED, 2010).



2.2.4.1 Transesterificação em Uma Etapa

Quando o teor de ácido graxo livre no óleo de cozinha usado é menor, uma reação de transesterificação de uma etapa é suficiente, onde o óleo de cozinha residual é diretamente transesterificado usando álcool e o catalisador. A fabricação de biodiesel a partir de óleo de girassol residual usando proporções molares variadas de metanol para óleo (4,5:1; 6:1; e 9:1) e na presença de hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH) como catalisadores. A conversão máxima foi obtida com uma razão molar de metanol para óleo de 6:1, um valor de ácido KOH/g de 1%, temperaturas de 25 °C e um período de reação de 30 min. O biodiesel obtido foi de excelente qualidade foi gerado a partir de óleo de cozinha residual usando uma proporção molar de metanol para óleo de 6:1, 1% de KOH, uma duração de reação de 90 minutos e temperaturas de reação de 25 °C. Foi determinado, no entanto, que o aumento da quantidade de catalisador e álcool não teve influência na conversão (TOMASEVIC; SILER-MARINKOVIC, 2003).

A geração de biodiesel a partir de óleo de cozinha residual usando proporções variadas de concentrações de metanol para óleo (3:1, 6:1 e 9:1), KOH e NaOH como catalisadores com concentrações variadas (0,5% e 1% p/p) e temperaturas de reação (25 °C e 65 °C). As condições ideais que geraram o melhor rendimento de aproximadamente 98,16% foram uma proporção molar de 6:1, um catalisador de KOH a 1% p/p e uma temperatura de reação de 65 °C. Enquanto isso, foi relatado que o KOH tinha uma taxa de conversão 1% maior que o NaOH (REFAAT et al., 2008).

2.2.4.2 Transesterificação em Duas Etapas

No caso de maior teor de ácido graxo livre, o óleo deve ser pré-tratado com uma base para reduzir seu teor de ácido graxo livre. Os catalisadores alcalinos são extremamente sensíveis à água da matéria-prima e à concentração de ácido graxo livre (MARCHETTI; MIGUEL; ERRAZU, 2007). Como resultado, muitos métodos de pré-tratamento, incluindo cromatografia em coluna (LEE; FOGLIA; CHANG, 2002), injeção de vapor (LERTSATHAPORNUSUK et al., 2005), neutralização, filtragem a vácuo (DIAS; ALVIM-FERRAZ; ALMEIDA, 2008) e evaporação a vácuo de filme (CVENGROŠ; CVENGROŠOVÁ, 2004), são utilizados para purificação de óleo de cozinha residual. Paralelamente, a fabricação de biodiesel é menos eficaz e mais difícil devido aos procedimentos de destilação a vapor e extração de álcool (TURKAY; CIVELEKOGLU, 1991), que exigem altas temperaturas e volumes significativos de solvente. O método de esterificação de ácido graxo livre com ácido sulfúrico servindo como catalisador reduziu o teor de ácido graxo livre do óleo de cozinha residual (LEUNG; WU; LEUNG, 2010).

Esta abordagem é compatível com catalisadores ácidos heterogêneos e homogêneos (DI SERIO et al., 2005). No entanto, os catalisadores ácidos sólidos são superiores aos catalisadores homogêneos em termos de benefícios (TURKAY; CIVELEKOGLU, 1991). Além disso, alguns pesquisadores reduziram o ácido graxo livre do óleo de cozinha residual usando resinas ácidas de troca iônica. O maior problema com esta técnica, porém, é a diminuição da atividade do catalisador. Utilizar glicerol como catalisador e matéria-prima ácida em alta temperatura (200 °C) para pré-tratar óleo residual é uma técnica nova, no entanto, aumentam o preço da produção de biodiesel. Na transesterificação por catálise ácida e alcalina, os problemas mais importantes são a taxa de reação mais lenta e a difícil separação de ésteres metílicos e glicerol devido à saponificação, respectivamente. Pesquisas buscam eliminar esses problemas usando a transesterificação catalisada por ácido e álcali em duas etapas (KOUZU et al., 2008; VAN GERPEN et al., 2004).

Usando um processo de duas etapas, foi sintetizado o biodiesel a partir de óleo de cozinha residual com uma taxa de conversão de 90%, em oposição à taxa de conversão de 50% da transesterificação catalisada por álcali de etapa única (ISSARIYAKUL et al., 2007).

A reação de transesterificação em duas etapas do óleo de cozinha residual apresenta uma conversão maior de até 30% em comparação ao processo de etapa única (ENCINAR; GONZÁLEZ; RODRÍGUEZ-REINARES, 2007).

A transesterificação em duas etapas resulta em um rendimento de 98% de éster metílico (biodiesel) em comparação com o rendimento de 86% de uma reação em uma única etapa (ÇAYLI; KÜSEFOĞLU, 2008).

O processo de transesterificação em dois estágios foi utilizado para produzir biodiesel a partir de diversas matérias-primas, apresentando resultados surpreendentes devido ao menor tempo de reação necessário na primeira etapa, ao uso de menos catalisador e à mistura direta da solução ácida e do metanol sem a necessidade de resfriamento entre eles. Os óleos de cozinha residual, de soja e de linhaça tiveram altas taxas de conversão, entre 97-98%, e conseguiram atingir rendimentos elevados de 87,5%, 92,3% e 93,3% para o óleo de cozinha usado, de soja usado e de linhaça usado, respectivamente (GUZATTO; DE MARTINI; SAMIOS, 2011).

2.2.4.3 Biodiesel

O biodiesel tem diferentes propriedades de éster metílico de ácidos graxos e pode ser um bom substituto para o combustível diesel de origem fóssil (SYAFIUDDIN et al., 2020), pois ele é derivado de fontes vegetais naturais primárias e é um substituto de combustível apropriado para um motor movido a diesel. Contém uma combinação de ésteres metílicos de ácidos graxos de cadeia longa (BIBIN et al., 2023) e pode ser produzido por diferentes como pirólise, micro emulsificação, transesterificação, entre outros.

Mais de 350 culturas oleaginosas foram identificadas para a produção de biodiesel, nas quais as matérias-primas foram determinadas como adequadas, como exemplo, a soja, a palma, o girassol, o óleo de pinhão, óleo de cozinha usado, óleo de pirólise, cártamo, semente de algodão, colza, óleo de laranja, óleos de amendoim, entre outras, e essas diferentes matérias-primas são divididas em quatro diferentes gerações para a produção do biodiesel (KRISHNAN et al., 2023).

Matérias-primas como soja, girassol, coco, palma e milho, entre outros, da primeira e segunda geração custam cerca de 70-80% da produção total de biodiesel, contudo, os resíduos e/ou óleos de cozinha usado, que fazem da terceira geração,

podem ser utilizados e isso reduz o custo em 60-70%, comprovando a viabilidade do uso deles para a produção de biodiesel (JEYASEELAN et al., 2023; SINGH et al., 2021).

O biodiesel é tido como uma opção aceitável para motores de combustão interna, uma vez que aumenta o tempo entre a injeção de combustível e o início da combustão com atrasos de ignição mais curtos, promove combustão mais limpa e reduz o total de emissão de gases de efeito estufa (ATTIA et al., 2022; EL-ZOHEIRY et al., 2020; GAD et al., 2021). Contudo, o motor movido a biodiesel tem a combustão influenciada por diferentes fatores, como matérias-primas utilizadas para a produção do biodiesel, propriedades do combustível, tempo de injeção, tipo de motor e outras condições operacionais (MAHMUDUL et al., 2017). As propriedades mais significativas do biodiesel a serem consideradas são a viscosidade, o comprimento da cadeia dos compostos e o grau de insaturação (BIBIN et al., 2023; MANAF et al., 2019).

2.3 Certificações para Edificações Verdes

Atualmente no Brasil, os setores comercial, residencial e público, correspondem por mais da metade do consumo nacional de energia elétrica (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2023) e devido a essa influência que exercem no balanço energético nacional, eles são setores que apresentam grande potencial para implantação de conservação, eficiência e autonomia energética (PINTO OLIVEIRA; CHIANCA PIMENTEL FILHO; ALENCAR FREITAS, 2021).

Os edifícios sustentáveis, ou edifícios verdes, defendem que a implementação de algumas práticas e layouts construtivos nos edifícios podem reduzir significativamente o seu impacto ambiental negativo, focando-se nas áreas de: planejamento sustentável do local, eficiência hídrica e energética, fontes alternativas de energia, conservação de materiais e recursos, autonomia energética e qualidade do ambiente interno (JAMOUISSI; ABU-RIZAIZA; AL-HAIJ, 2022).

Algumas certificações de edifícios sustentáveis com validade internacional são: LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), AQUA (*High Environmental Quality*), BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology*), GBC Brasil CASA (*Green Building Council Brasil CASA*) e GBC Brasil Zero Energy (*Green Building Council Brasil Energia Zero*), entre muitas outras

(WORLD GREEN BUILDING COUNCIL, 2023). Pesquisas indicam que entre diferentes certificações de mesma categoria, aquelas desenvolvidas para uma realidade local específica acaba tendo melhor desempenho que os demais, por atenderem a critérios particulares que os demais não consideram (GRÜNBERG; MEDEIROS; TAVARES, 2014)

2.3.1 GBC Brasil Zero Energy

A certificação GBC Brasil Zero Energy foi desenvolvida para ser uma ferramenta prática e eficiente que visa o equilíbrio energético entre consumo e a geração de eletricidade em edificações. Ela encontra-se dentro da categoria *Net Zero Energy Building* que certificam edifícios que comprovam o consumo de energia elétrica local anual zerado por combinar alta eficiência e geração de energia por fonte renováveis (GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL, 2017). Para que a edificação seja certificada, 13 pontos são analisados:

- Tempo de Operação;
- Taxa de Ocupação Mínima;
- Metragem Mínima das Áreas Construídas;
- Tipologia;
- Atendimento a Legislações;
- Empreendimento *Off Grid*;
- Eficiência Energética Mínima para Geração *On Site*;
- Eficiência Energética Mínima para Geração *Off Site*;
- Geração de Energia Renovável *On Site*;
- Geração de Energia Renovável *Off Site*;
- Compra de Créditos de Energia Renovável;
- Uso de Energia Não Renovável;
- Balanço Energético Anual do Empreendimento.

Os objetivos desta certificação incluem atender a metas estipuladas na COP Paris, acelerar a mudança no mercado energético nacional, buscar o desenvolvimento

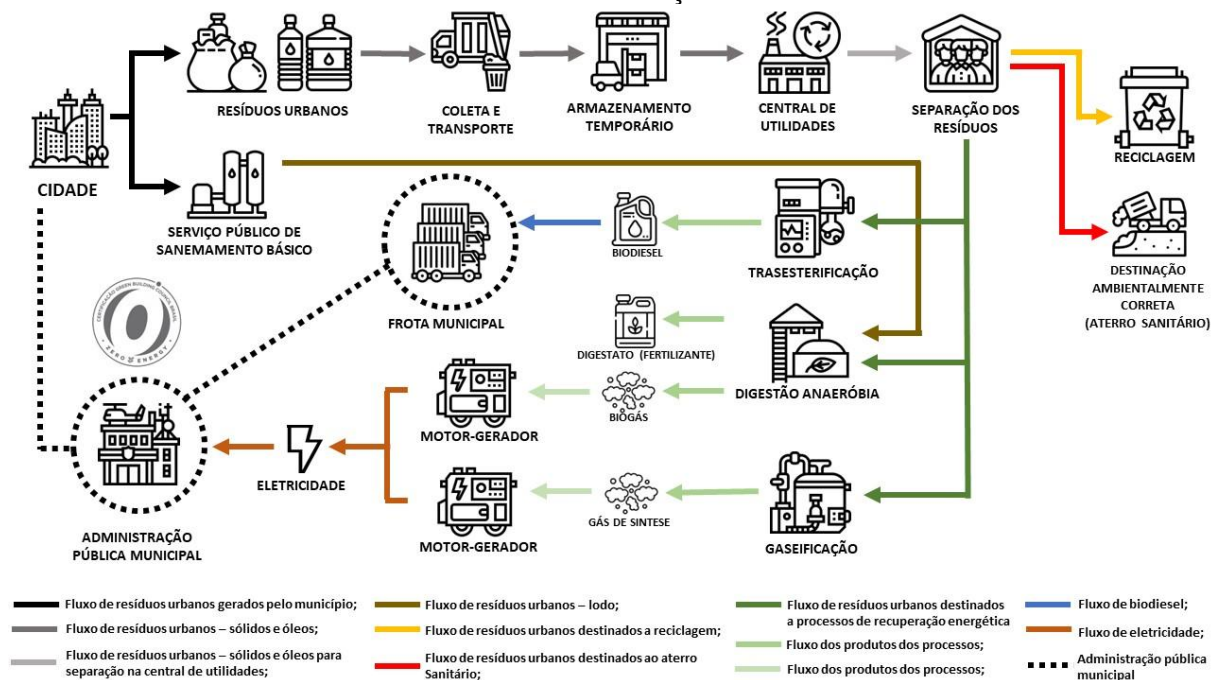
de novas tecnologias e promover ambientes mais saudáveis, a fim de promover bem-estar e qualidade de saúde para os ocupantes.

3 METODOLOGIA

3.1 Proposta de Central de Utilidade para Geração de Bioenergia a partir de Resíduos Urbanos para Municípios Brasileiros

A central de utilidades proposta para a geração de bioenergia (eletricidade e biodiesel) a partir de resíduos urbanos pode ser observada na Figura 15. A central de utilidades concentrará os resíduos urbanos sólidos e óleos residuais, os quais passarão por um processo de separação semiautomatizado para direcionamento dos resíduos para os processos de transesterificação, digestão anaeróbia e gaseificação, e, quando for o caso, para reciclagem ou, então, para disposição final em aterro sanitário. Quando os resíduos forem direcionados para um dos processos para reaproveitamento energético, a depender do processo, seu produto final poderá ser eletricidade ou biodiesel para uso na administração pública municipal, que poderá resultar na certificação GBC Brasil *Zero Energy* (autonomia energética).

Figura 15 – Esquema simplificado da proposta de central de utilidades para geração de bioenergia a partir de resíduos urbanos para administração pública de municípios brasileiros com certificação sustentável



Fonte: elaboração própria.

As análises serão desenvolvidas com base na divisão populacional dos municípios adotado pelo IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021), que pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 – Divisão de municípios por porte populacional

Municípios por porte populacional [hab.]	Total de municípios	[%]
Até 5.000	1.250	22,44
De 5.001 até 10.000	1.201	21,56
De 10.001 até 20.000	1.319	23,68
De 20.001 até 50.000	1.120	20,11
De 50.001 até 100.000	354	6,36
De 100.001 até 500.000	277	4,97
Mais de 500.000	49	0,88
Brasil	5.570	100

Fonte: Adaptado de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, (2021).

3.2 Análise Energética

3.2.1 Biogás

Adotou-se para este trabalho a proporção de mistura de substratos de 60:40 (lodo de esgoto:fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos) contendo 7,5% de sólidos totais presentes, com média 40 dias de retenção, apresentando um biogás com composição de 72% de CH₄ e 28% de CO₂, e uma expectativa de produção de biogás 148,75 Nm³/t_{resíduo}·dia de mistura de substrato (BILOTTA; ROSS, 2016; KUMARI; CHANDEL, 2023).

O Poder Calorífico Inferior do biogás pode ser definido pela Equação 1 (PAULINO, 2017):

$$PCI_{biogás} = \frac{-H_p + H_r}{MM_{biogás}} \quad (1)$$

Onde:

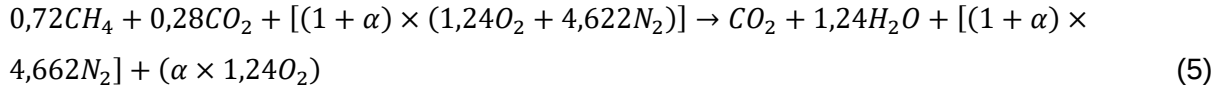
H_p : entalpia do produto da combustão [kJ/kmol].

H_r : entalpia do reagente na combustão [kJ/kmol].

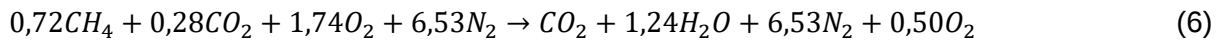
$MM_{biogás}$: massa molar do biogás [kg/kmol].

$PCI_{biogás}$: poder calorífico inferior do biogás [kJ/kg].

A real reação de combustão do biogás pode ser observada na Reação 5, considerando um valor de 40% para o coeficiente de excesso de ar (α), pelo fato do biogás ser queimado em motor de combustão interna (XAVIER, 2016).



Resultando na Reação 6:



A entalpia do reagente na combustão (H_r) e do produto da combustão (H_p) podem ser calculados pelas Equações 2 e 3, respectivamente (XAVIER, 2016):

$$H_r = 0,72 \times (\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{CH_4} + 0,28 \times (\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{CO_2} + 1,74 \times (\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{O_2} + 6,53 \times (\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{N_2} \quad (2)$$

$$H_p = (\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{CO_2} + 1,24 \times (\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{H_2O} + 6,53 \times (\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{N_2} + 0,50 \times (\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{O_2} \quad (3)$$

Os valores das diferença entálpica ($\Delta\bar{h}$) e entalpia ($\bar{h}_f^0$) dos elementos do biogás foram obtidos para uma temperatura de 298 K (BORGNAKKE; SONNTAG, 2018).

A massa molar do biogás pode ser calculada pela Equação 4 (PAULINO, 2017):

$$MM_{biogás} = 0,72 \times MM_{CH_4} + 0,28 \times MM_{CO_2} \quad (4)$$

Onde:

$MM_{biogás}$: massa molar do biogás [kg/kmol].

MM_{CH_4} : massa molar do metano – 16,04 kg/kmol.

MM_{CO_2} : massa molar do dióxido de carbono – 44,01 kg/kmol.

Sendo assim, torna-se possível calcular a massa molar do biogás com 72% de CH_4 e 28% de CO_2 que resultou em 23,87 kg/kmol, possibilitando também o cálculo do PCI do biogás de 22.173,92 kJ/kg.

3.2.2 Biodigestor

Adotou-se para este trabalho o uso do biodigestor modelo canadense, ou também conhecido como lagoa coberta, por ser um modelo mais moderno em relação ao demais e ainda assim ser de fácil operação. Segundo Cestonaro do Amaral, Radis Steinmetz e Kunz (2019a), as Equações 5 a 7 são usadas para dimensionar um biodigestor tipo lagoa coberta. Através da Equação 5 pode-se determinar a quantidade de substrato a ser gerado diariamente.

$$Q = (LE + FO) \times \alpha \quad (5)$$

Onde:

FO: quantidade da fração orgânica nos resíduos sólidos urbanos gerados diariamente [kg/dia].

LE: quantidade de lodo de esgoto gerada diariamente [kg/dia].

Q: quantidade de substrato gerado diariamente [m³/dia].

α : fator de conversão de densidade para matéria orgânica, igual a 0,000825 m³/kg (LUZ, 2022).

Pode-se calcular o volume do biodigestor a partir da Equação 6:

$$V = \frac{Q \times S_o}{COV} \quad (6)$$

Onde:

COV: carga orgânica volumétrica ¹ [$kg_{SV}/m^3 \cdot dia$].

Q: quantidade de substrato gerado diariamente [m³/dia].

S_o: concentração de sólidos voláteis na mistura ² [kg_{SV}/m^3].

V: volume do biodigestor a ser construído [m³].

¹ O valor da carga orgânica volumétrica para biodigestor lagoa coberta pode variar entre 0,3 e 0,5 $kg_{SV}/m^3 \cdot dia$, adotado para esse caso 0,5 $kg_{SV}/m^3 \cdot dia$.

² A concentração de sólidos voláteis na mistura é dada por 10,48 kg_{SV}/m^3 para o lodo de esgoto e 33,67 kg_{SV}/m^3 para a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (KUMARI; CHANDEL, 2023).

O tempo de retenção hidráulica do substrato no biodigestor para produção de biogás é dado pela Equação 7:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (7)$$

Onde:

Q : quantidade de substrato gerado diariamente [m^3 /dia].

TRH : tempo de retenção hidráulica [dias].

V : volume do biodigestor a ser construído [m^3].

Esse tipo de biodigestor tem algumas especificidades a serem seguidas, como: manter a relação mínima 2x1 (comprimento x largura), ter profundidade entre 3 e 4,5 m, e manter a angulação do talude em 45° (CESTONARO DO AMARAL; RADIS STEINMETZ; KUNZ, 2019a).

3.2.3 Gás de Síntese

Adotou-se para este trabalho como combustível para produção do gás de síntese uma mistura combustível composta de matéria orgânica (lodo), plástico, papel e papelão, madeira, têxteis, couro e borracha, a fim destinar parte dos resíduos urbanos gerados diariamente. A gravimetria simplificada da mistura proposta é dada 52,78% de matéria orgânica (lodo), 22,90% de plástico, 13,45% de papel e papelão, 5,43% de couro e borracha, 2,72% de madeira e 2,72% de têxteis. A composição do gás de síntese produzido pode ser vista na Tabela 4 (MEDINA JIMENEZ; BERECHÉ; NEBRA, 2019).

Tabela 4 – Composição do gás de síntese	
Componente	Volume [%]
CO	19,11
CH_4	0,59
H_2	18,90
H_2O	9,30
N_2	44,42
CO_2	7,68

Fonte: Adaptado de Medina Jimenez, Bereche, Nebra (2019).

O poder calorífico inferior da mistura combustível é de 9.200 kJ/kg. De acordo com Castillo Santiago *et al.* (2021), Biancini *et al.* (2023) e Lee (2022), o poder calorífico do gás de síntese pode ser estimado a partir da porcentagem volumétrica de CH₄, H₂ e CO, expressos na Equação 8.

$$PCI_{syngas} = y_{H_2} \times PCI_{H_2} + y_{CO} \times PCI_{CO} + y_{CH_4} \times PCI_{CH_4} \quad (8)$$

Onde:

PCI_{syngas} : poder calorífico inferior do gás de síntese [kJ/kg].

PCI_{CH_4} : poder calorífico inferior do metano [kJ/kg].

PCI_{CO} : poder calorífico inferior do monóxido de carbono [kJ/kg].

PCI_{H_2} : poder calorífico inferior do hidrogênio [kJ/kg].

y_{CH_4} : fração volumétrica do metano na mistura gasosa [-].

y_{CO} : fração volumétrica do monóxido de carbono na mistura gasosa [-].

y_{H_2} : fração volumétrica do hidrogênio na mistura gasosa [-].

O poder calorífico inferior do gás de síntese adotado é de 4.268 kJ/kg (MEDINA JIMENEZ; BERECHÉ; NEBRA, 2019).

3.2.4 Gaseificador

No que diz respeito à gaseificação, a eficiência de conversão energética é avaliada principalmente através de parâmetros como a eficiência de gás frio, eficiência de gás quente ou eficiência térmica. Estes parâmetros avaliam a eficiência de utilização de energia de gaseificadores, o desempenho adiabático de gaseificadores (DUAN *et al.*, 2016). Será utilizado para avaliar a conversão energética a eficiência de gás frio que pode ser calculada através da Equação 9 (CASTILLO SANTIAGO *et al.*, 2021; FURUSAWA *et al.*, 2019; NIU *et al.*, 2013).

$$\eta_{gf} = \frac{Rend_{syngas} \times PCI_{syngas}}{PCI_{mist_comb}} \quad (9)$$

Onde:

PCI_{mist_comb} : poder calorífico da mistura combustível que alimenta o gaseificador [kJ/kg].

PCI_{syngas} : poder calorífico do gás de síntese [kJ/kg].

$Rend_{syngas}$: rendimento da produção de gás de síntese por quilo da mistura combustível – para os gaseificadores selecionados, o rendimento tem valor entre 1,95 e 2,00, sendo adotado o valor de 1,95 para cálculo.

η_{gf} : eficiência de gás frio [-].

3.2.5 Motor de Combustão Interna a Gás

Os parâmetros adotados em experimentos laboratoriais pelo fabricante para que o motor possa gerar a potência máxima de projeto podem divergir dos parâmetros na aplicação prática, sendo assim, faz-se necessário o cálculo de parâmetros para assegurar a geração da potência indicada pelo fabricante. A eficiência elétrica do motor de combustão interna pode ser calculada pelas Equações 10 e 11 (XAVIER, 2016).

$$\eta_{emci} = \frac{E_{p_{mci}}}{E_{comb}} \quad (10)$$

$$E_{comb} = \dot{m}_{comb_{fab}} \times PCI_{comb} \quad (11)$$

Onde:

$E_{p_{mci}}$: potência elétrica produzida pelo motor de combustão interna [kW].

E_{comb} : potência provinda do combustível [kW].

$\dot{m}_{comb_{fab}}$: fluxo mássico de combustível dado pelo fabricante ³ [kg/s].

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

η_{emci} : eficiência elétrica de conversão do motor de combustão interna [-].

³ Para conversão de gases: 1 kg de dióxido de carbono equivale a 0,5064 Nm³ e 1 Nm³ equivale 1,975; e 1 kg de metano equivale a 1,3945 Nm³ e 1 Nm³ equivale a 0,7171 (NITROTEC, 2020).

Para determinar qual o fluxo mássico de combustível a ser usado no motor de combustão interna, tem-se a Equação 12 (MOURA; SILVEIRA; LAMAS, 2020).

$$\dot{m}_{comb_{real}} = \frac{E_{p_{mci}}}{\eta_{e_{mci}} \times PCI_{comb}} \quad (12)$$

Onde:

$E_{p_{mci}}$: potência elétrica produzida pelo motor de combustão interna [kW].

$\dot{m}_{comb_{real}}$: fluxo mássico de combustível calculado para o PCI do combustível usado [kg/s].

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

$\eta_{e_{mci}}$: eficiência elétrica de conversão do motor de combustão interna [-].

3.2.6 Transesterificação

Os valores médios das propriedades do óleo de cozinha usado como índice de acidez, ponto de fulgor, viscosidade e Massa específica, são apresentadas na Tabela 5 (VAISHNAVI SREE et al., 2021).

Tabela 5 – Propriedades do óleo de cozinha usado

Propriedade	Valor
Índice de acidez	0,7–0,8 [mg NaOH/g.amostra]
Massa específica	0,905 [g/ml]
Ponto de fulgor	240 [°C]
Viscosidade cinemática	31 [mm ² /s]
Conteúdo de água	1,09 [mg/kg]

Fonte: Adaptado de Vaishnavi Sree et al., (2021).

Para que o processo de transesterificação seja adequado o percentual de ácidos graxos livres deve ser inferior a 2%, podendo ser determinado pelas Equações 13 e 14 (MERCY NISHA PAULINE et al., 2021).

$$\text{Índice de acidez} = \frac{MM_{NaOH} \times V \times N}{PA} \quad (13)$$

Onde:

Índice de acidez: índice de acidez [mg NaOH/g.amostra] - número de miligramas de hidróxido de potássio necessários para neutralizar os ácidos graxos livres presentes em um grama de gordura.

MM_{NaOH} : massa molecular do hidróxido de sódio [g/mol].

N : Normalidade da solução de hidróxido de sódio [g].

PA : Peso da amostra [g].

V : volume de solução de hidróxido de sódio necessário para titulação [mL].

$$AGL = \frac{\text{Índice de acidez}}{2} \quad (14)$$

Onde:

AGL : ácido graxos livres [%].

3.2.7 Biodiesel

O processo de transesterificação é um processo químico mundialmente difundido e bem estabelecido no Brasil para produção de biodiesel. Esse processo tem grande eficiência de conversão de óleos em biodiesel, tendo percentuais entre 90,60–96,00% de rendimento (FEREIDOOONI; TAHVILDARI; MEHRPOOYA, 2018; JAIN; SHARMA; RAJVANSI, 2011; MANDOLESI DE ARAÚJO et al., 2013; ULAKPA et al., 2022). Segundo Mercy Nisha Pauline et al. (2021), pode-se definir a produção de biodiesel a partir da transesterificação de óleo de cozinha usado através da Equação 15.

$$V_{biodiesel} = V_{OCU} \times \eta_{biodiesel} \quad (15)$$

Onde:

$V_{biodiesel}$: volume de biodiesel produzido no processo de transesterificação [L].

V_{OCU} : volume de óleo de cozinha usado [L].

$\eta_{biodiesel}$: eficiência de conversão do óleo de cozinha usado em biodiesel [-] – foi adotado para este estudo o valor de 0,93 (MERCY NISHA PAULINE et al., 2021).

3.3 Análise Econômica

O desenvolvimento da análise econômica tem como objetivo comprovar a viabilidade econômica do modelo proposto de uma Central de Utilidade para geração de bioenergia fazendo uso de resíduos urbanos como matéria-prima. Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros e referências utilizadas para a realização da análise.

Tabela 6 - Parâmetros da análise econômica

Parâmetro	Valor e Unidade	Referência
Investimento para aquisição do motor de combustão interna.	500 €/kW	COPA et al. (2020)
Investimento para aquisição do gaseificador de biomassa, sistema de limpeza e condicionamento de gás.	2.500 €/kW	COPA et al. (2020)
Custo de operação e manutenção ($C_{op.man_{ge}}$) – considerando custos indiretos de operação, salários e manutenção de equipamentos.	10% do custo de investimento	COPA et al. (2020)
Custo de coleta e transporte de resíduos.	50 US\$/ton	KLAIMI; ALNOURI; STIJEPOVIĆ (2022)
Custo do combustível – gás de síntese	0,044 US\$/kWh	Calculado ⁴
Custo do combustível – biogás	0,140 US\$/kWh	Calculado ⁵
Preço do óleo de cozinha usado.	0,59 R\$/L	GUABIROBA et al. (2017)
Preço do Diesel S-10	6,24 R\$/L	Cotação de 08/2024
Custo para construção de biodigestor lagoa coberta – considerando sistema de tratamento, lagoa de digestato, flare, gasoduto interno e ponto de conexão cabinado.	162,37 R\$/m ³	MACHADO, L. DO P. et al. (2020)
Tarifa de energia elétrica.	1,05 R\$/kWh	ANEEL (2024)
Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) – medida usada no Mercado Livre de Energia para estabelecer o valor da energia elétrica.	103,19 R\$/MWh	CCEE (2024)

⁴ O custo do biogás foi calculado com os seguintes dados: 1kg resíduo = 0,05 US\$; 1kg resíduo = 0,148Nm³ de biogás; 1Nm³ de biogás no motor = 2,327 kWh. Chegando ao custo de 0,14 US\$/kWh.

⁵ O custo do gás de síntese foi calculado com os seguintes dados: 1kg resíduo = 0,05 US\$; 1kg resíduo = 2Nm³ de gás de síntese; 1Nm³ de gás de síntese no motor = 0,561 kWh. Chegando ao custo de 0,044 US\$/kWh.

Cotação do dólar americano.	1 US\$ = 5,67 R\$	Cotação de 06/08/2024
Cotação do euro.	1 €\$ = 6,18 R\$	Cotação de 06/08/2024

Fonte: Elaboração própria.

Segundo o experimento conduzido por Guabiroba et al. (2017), aproximadamente 70% do custo de produção do biodiesel através do processo de transesterificação é dado pelo preço do óleo de cozinha usado, sendo assim, pode chegar a um custo de produção do biodiesel próximo de 0,84 R\$/L ou 0,15 US\$/L.

3.3.1 Fator de Anuidade

O fator de anuidade é expresso como o valor de um fluxo de rendimentos que produz um lucro em um período determinado, considerando uma taxa de juros anual e um período de amortização, conhecido como *payback*. O fator de anuidade está definido pelas Equações 13 e 14 (SILVEIRA et al., 2012).

$$f = \frac{q^{k \times (q-1)}}{q^k - 1} \quad (13)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (14)$$

Onde:

f : fator de anuidade [1/ano].

k : período de amortização de capital [anos].

r : taxa anual de juros [%] - as taxas anuais de juros utilizadas nesta análise são de 4%, 8% e 12%.

3.3.2 Custo da Eletricidade Gerada pela Central de Utilidades

De acordo com Laranci, Silveira e Lamas (2012), o custo da energia elétrica gerada por uma planta de forma genérica pode ser definido pela Equação 15.

$$C_{geCU} = \frac{Inv \times f}{H \times P_{CU}} + \frac{C_{comb_s} \times E_{comb_s}}{E_{pmci.s}} + \frac{C_{comb_b} \times E_{comb_b}}{E_{pmci.b}} + C_{op.manCU} \quad (15)$$

Onde:

C_{geCU} : custo de eletricidade gerada pela central de utilidades [US\$/kWh].

$C_{op.manCU}$: custo de operação e manutenção da central de utilidades [US\$/kWh].

C_{comb_b} : custo do combustível – biogás [US\$/kWh].

C_{comb_s} : custo do combustível – gás de síntese [US\$/kWh].

E_{comb_b} : potência provinda do combustível – biogás [kW].

E_{comb_s} : potência provinda do combustível – gás de síntese [kW].

$E_{pmci.b}$: potência elétrica produzida pelo motor de combustão interna - biogás [kW].

$E_{pmci.s}$: potência elétrica produzida pelo motor de combustão interna - gás de síntese [kW].

f : fator de anuidade [1/ano].

H : período de operação da central de utilidades [h/ano].

Inv : investimento da central de utilidades [US\$].

P_{CU} : potência da central de utilidades [kW].

3.3.3 Receita Anual Esperada pela Eletricidade Gerada

Para conhecer o período de retorno do investimento (*payback*), é utilizada a Equação 16, a qual foi adaptada e define o rendimento anual esperado (LARANCI; SILVEIRA; LAMAS, 2012).

$$G_{el} = P_{CU} \times H \times (C_{Elet} - C_{geCU}) + PLD \times E_{Elet} \quad (16)$$

Onde:

C_{Elet} : custo da eletricidade da concessionária [US\$/kWh].

C_{geCU} : custo de eletricidade gerada pela central de utilidades [US\$/kWh].

E_{Elet} : excedente de energia elétrica anual [MWh/ano].

G_{el} : rendimento anual esperado ao longo de um período [US\$].

H : período de operação da central de utilidades [h/ano].

P_{CU} : potência da central de utilidades [kW].

PLD : preço de liquidação das diferenças [US\$/MWh].

3.4 Análise Ambiental

3.4.1 Indicador de Eficiência Ecológica

A fim de mensurar a análise ambiental dos processos envolvidos no sistema proposto, o indicador de eficiência ecológica (ε) será aplicado, sendo ele definido como um indicador do desempenho de uma usina termoeletrica quanto às emissões de poluentes, onde elas são comparadas à emissão de carbono equivalente $(CO_2)_{eq}$, e a eficiência ecológica pode ser calculada a partir da Equação 17 (BOLOY et al., 2011; CÂRDU; BAICA, 1999; CORONADO et al., 2014).

$$\varepsilon = \left[\frac{0,2 \times \eta \times \ln(145,6 - \Pi_p)}{\eta + \Pi_p} \right]^{1,9} \quad (17)$$

Onde:

ε : indicador eficiência ecológica [-].

η : eficiência do processo [-].

Π_p : indicador de poluição [$kgCO_2/MJ$].

O indicador de eficiência ecológica (ε) apresenta um resultado com valor entre 0 e 1, sendo interpretado como 0 sendo uma tecnologia com o menor nível de eficiência e 1 com o maior nível de eficiência. Sendo para este estudo aplicado ao motor de combustão interna e considerando a sua eficiência elétrica.

3.4.2 Indicador de Poluição

Para a determinação do indicador de poluição (Π_p) é aplicada a Equação 18 (BOLOY et al., 2011).

$$\Pi_p = \frac{(CO_2)_{eq}}{PCI_{comb}} \quad (18)$$

Onde:

$(CO_2)_{eq}$: concentração de dióxido de carbono equivalente [$kg(CO_2)_{eq}/kg_{comb}$].

PCI_{comb} : poder calorífico inferior do combustível [MJ/kg_{comb}]

Foi considerado para os cálculos do indicador de poluição as seguintes concentrações de dióxido de carbono equivalente: 3,57 kg(CO₂)_{eq}/kg_{syngas} (LUZ et al., 2015), 3,29 kg(CO₂)_{eq}/kg_{biogás} (XAVIER, 2016) e 3,42 kg(CO₂)_{eq}/kg_{biodiesel} (CORONADO et al., 2009).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados e Discussões da Análise Energética

Tomando como as populações a serem consideradas para os cálculos o valor limite máximo de cada caso por porte populacional, temos assim: 5.000, 10.000, 20.000, 50.000, 100.000 e 500.000 habitantes, na Tabela 7 pode-se observar a quantidade estimada de resíduos sólidos urbanos, óleos residuais e lodo a serem gerados por dia para cada faixa populacional considerada, tomando como base os dados já informados nos capítulos anteriores.

Tabela 7 – Geração média estimada de resíduos urbanos diários por porte populacional

Casos por Porte Populacional (hab.)	Resíduos Sólidos Urbanos (kg/dia)	Lodo de ETE e ETA (kg/dia)	Óleos Residuais (L/dia)
Caso 1 - 5.000	5.215	5.400	280
Caso 2 - 10.000	10.430	10.800	560
Caso 3 - 20.000	20.860	21.600	1.120
Caso 4 - 50.000	52.150	54.000	2.800
Caso 5 - 100.000	104.300	108.000	5.600
Caso 6 - 500.000	521.500	540.000	28.000

Fonte: Elaboração própria.

Cada município apresenta características únicas que influenciam o seu consumo de energia elétrica, entre elas a sua população, área territorial e quantidade de instalações (residenciais, comerciais, rurais, industriais, iluminação pública, poder público e serviços públicos) e o tamanho das instalações, entre outras. Para este estudo foi considerado o consumo de energia elétrica do poder público (legislativo, executivo e judiciário) municipal que são unidades de administração direta, a fim de alcançar a sua autonomia energética para obter a certificação GBC Brasil Zero Energy.

Foi realizado uma média ponderada entre os dados municipais disponíveis resultando em um valor médio de consumo de energia elétrica por instalação do poder público em cada município para cada faixa populacional estabelecida, bem como um valor médio de instalações do poder público em cada cidade (SECRETARIA DE

INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE, 2020), que pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 – Estimativa média de instalações do poder público por município e seus respectivos gastos médios com eletricidade por porte populacional

Casos por Porte Populacional (hab.)	Quantidade Média de Instalações do Poder Público (und.)	Consumo Médio de Eletricidade por Instalação (MWh/ano)	Consumo Médio de Eletricidade do Poder Público Municipal (MWh/ano)
Caso 1 – 5.000	37	9,17	339,29
Caso 2 – 10.000	53	9,51	504,03
Caso 3 – 20.000	88	12,83	1.129,04
Caso 4 – 50.000	139	19,39	2.695,21
Caso 5 – 100.000	202	24,39	4.926,78
Caso 6 – 500.000	828	23,00	19.044,00

Fonte: Elaboração própria.

4.1.1 Biodigestor, Biogás e Motor de Combustão Interna a Biogás

Na Tabela 9 pode-se observar as quantidades de lodo (parcial) e fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos gerados diariamente pela população municipal, dados extraídos da Tabela 7. A mistura do substrato adotada para a digestão anaeróbia foi a 60:40 (lodo de esgoto:fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos), sendo que a quantidade total da fração orgânica será tomada como referência para os 40% da mistura, a fim de eliminar essa parcela dos resíduos sólidos urbanos equivalente a 43% do total gerado diariamente por habitante e correspondendo a 0,448 kg/hab.dia. A porção de lodo correspondente a 60% equivale a 0,672 kg/hab.dia.

Tabela 9 – Geração média estimada de lodo (parcial) e da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos diários por porte populacional

Casos por Porte Populacional [hab.]	Lodo de ETE e ETA [kg/dia]	Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos [kg/dia]	Mistura (60:40) [kg/dia]
Caso 1 – 5.000	3.360	2.240	5.600
Caso 2 – 10.000	6.720	4.480	11.200
Caso 3 – 20.000	13.440	8.960	22.400
Caso 4 – 50.000	33.600	22.400	56.000
Caso 5 – 100.000	67.200	44.800	112.00
Caso 6 – 500.000	336.600	224.000	560.000

Fonte: Elaboração própria.

A partir desses dados e aplicando as Equações 5, 6 e 7, foi possível determinar as dimensões e as quantidades de biodigestores de lagoa coberta necessários, a expectativa de tempo de retenção hidráulica e produção de biogás, que podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 – Dimensionamento dos biodigestores e suas quantidades, tempo de retenção e produção de biogás estimada

Casos por Porte Populacional [hab.]	Dimensões do biodigestor (C x L x P) [m]	Quant. [und.]	Tempo de Retenção Hidráulica [dias]	Total de Biogás Gerado [Nm³/dia]
Caso 1 – 5.000	8 x 4 x 3	2	40 dias	833,00
Caso 2 – 10.000	8 x 4 x 4	3		1.666,00
Caso 3 – 20.000	8 x 4 x 4	6		3.332,00
Caso 4 – 50.000	16 x 8 x 4	4		8.330,00
Caso 5 – 100.000	16 x 8 x 4,5	7		16.660,00
Caso 6 – 500.000	16 x 8 x 4,5	32		83.300,00

Fonte: Elaboração própria.

Sabendo a estimativa de geração de biogás diária foi possível determinar quais grupos geradores eram mais adequados para cada caso. Foram selecionados modelos da empresa ER-BR por apresentarem a possibilidade de operar de forma contínua 24 h/dia por 7 dias na semana com carga total. A partir desses dados foram

aplicadas as Equações 10, 11 e 12, e a Tabela 11 mostra as principais características dos modelos escolhidos e os resultados dos ajustes necessários para que o grupo gerador atingisse a potência de catálogo com a composição do biogás gerado.

Tabela 11 – Especificações técnicas dos motores de combustão interna a biogás

Modelo	Eficiência Elétrica (η_{emci}) [%]	Potência Elétrica [kW]	Consumo de Biogás (75% de CH₄) [Nm³/h]	Consumo de Biogás Ajustado (72% de CH₄) [Nm³/h]
GMWM30	22,05	20	12,00	12,85
GMWM50	24,90	32	17,00	18,21
GMWM80	25,09	55	29,00	31,06
GMWM120	24,80	75	40,00	42,84
GSCA250	33,60	160	63,00	67,48
GSCA330	32,26	200	82,00	87,83
GSCA420	33,07	250	100,00	107,11

Fonte: Elaboração própria baseado em ER-BR (2023).

Tendo os valores ajustado de consumo de biogás dos grupos geradores para atingir a potência elétrica de catálogo, foi possível determinar quais modelos e as suas respectivas quantidades, visando o maior aproveitamento do biogás gerado, como pode ser visto na Tabela 12.

Tabela 12 – Seleção de motores de combustão interna a biogás e suas quantidades, consumo de biogás e geração de energia elétrica

Casos por Porte Populacional [hab.]	Modelo	Quant. [und.]	Biogás Consumido [Nm³/dia]	Biogás Não Consumido [Nm³/dia]	Energia Elétrica Gerada [kWh/dia]
Caso 1 – 5.000	GMWN80	1	745,49	87,51	1.320,00
Caso 2 – 10.000	GSCA250	1	1.619,51	46,49	3.840,00
Caso 3 – 20.000	GSCA420	1	2.570,65	15,86	6.000,00
	GMWN80	1	745,49		1.320,00
Caso 4 – 50.000	GSCA420	3	7.711,96	181,03	18.000,00
	GMWM50	1	437,01		768,00
Caso 5 – 100.000	GSCA420	6	15.423,92	207,82	36.000,00

	GMWM120	1	1.028,26		1.800,00
Caso 6 – 500.000	GSCA420	32	82.260,88	10,86	192.000,00
	GMWM120	1	1.028,26		1.800,00

Fonte: Elaboração própria.

4.1.2 Gaseificador, Gás de Síntese e Motor de Combustão Interna a Gás de Síntese

Na Tabela 13 pode-se observar as quantidades geradas por habitante diariamente de lodo (parcial) equivalendo a 0,408 kg/hab.dia, valor esse que é referente a parte restante do lodo, tendo sido a outra parte utilizada na mistura para digestão anaeróbia, plástico equivalendo a 0,177 kg/hab.dia, papel e papelão equivalendo a 0,104 kg/hab.dia, madeira equivalendo a 0,021 kg/hab.dia, têxtil equivalendo a 0,021 kg/hab.dia, couro e borracha equivalendo as 0,042 kg/hab.dia. Os valores são, então, multiplicado pela quantidade de habitantes descrita em cada caso, sendo assim, ser possível prever a geração média de cada resíduo.

A mistura combustível a ser usado é composta integralmente pelos resíduos e quantidades mencionadas.

Tabela 13 – Geração média estimada de lodo (parcial), plástico, papel e papelão, madeira, têxtil, couro e borracha, diários por porte populacional

Casos por Porte Populacional (hab.)	Lodo de ETE e ETA (kg/dia)	Plástico (kg/dia)	Papel e Papelão (kg/dia)	Madeira (kg/dia)	Têxtil (kg/dia)	Couro e Borracha (kg/dia)
Caso 1 – 5.000	2.040	885	520	105	105	210
Caso 2 – 10.000	4.080	1.770	1.040	210	210	420
Caso 3 – 20.000	8.160	3.540	2.080	420	420	840
Caso 4 – 50.000	20.400	8.850	5.200	1.050	1.050	2.100
Caso 5 – 100.000	40.800	17.700	10.400	2.10	2.10	4.200
Caso 6 – 500.000	204.000	88.500	52.000	10.50	10.50	21.000

Fonte: Elaboração própria.

A partir das quantidades diárias de resíduos expostas na Tabela 13 é realizada a soma delas, sendo assim possível determinar a quantidade de mistura combustível diária que pode ser observada na Tabela 14. Na Tabela 15 pode-se observar as

especificações dos modelos de gaseificadores de leito fluidizado da marca Kexin (QINGDAO KEXIN NEW ENERGY TECHNOLOGY, 2023).

Tabela 14 – Quantidade total de mistura combustível gerada diariamente	
Casos por Porte Populacional [hab.]	Mistura Combustível [kg/dia]
Caso 1 – 5.000	3.865,00
Caso 2 – 10.000	7.730,00
Caso 3 – 20.000	15.460,00
Caso 4 – 50.000	38.650,00
Caso 5 – 100.000	73.100,00
Caso 6 – 500.000	365.500,00

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 15 – Especificações técnicas dos gaseificadores de leito fluidizado				
Modelo	Potência Elétrica [kW]	Eficiência de Gás Frio (η_{gf}) [%]	Consumo de Mistura Combustível [kg/h]	Produção de Gás de Síntese [Nm ³ /h]
JXQ-10A	3		5,00	10,00
JXQ-30B	10		15,00	30,00
KX-100SB	30		50,00	100,00
KX-150SB	50		75,00	150,00
KX-300SB	100		150,00	300,00
KX-450SB	150	90,46	230,00	450,00
KX-600SB	200		300,00	600,00
KX-750SB	250		330,00	750,00
KX-900SB	300		450,00	900,00
KX-1200SB	400		600,00	1.200,00
KX-1500SB	500		750,00	1.500,00

Fonte: Elaboração própria baseado em Qingdao Kexin New Energy Technology (2023).

Sabendo as quantidades de mistura combustível e tendo disponível as informações técnicas dos diferentes gaseificadores, determinou-se quais modelos eram mais adequados para cada caso e as suas quantidades, o consumo de mistura combustível para produção de gás de síntese e quanto dele foi produzido, como pode ser visto na Tabela 16.

Tabela 16 – Seleção de gaseificadores de leito fluidizado e suas quantidades, consumo de mistura combustível e produção de gás de síntese

Casos por Porte Populacional [hab.]	Modelo	Quant. [und.]	Mistura Consumida [kg/dia]	Mistura Não Consumida [kg/dia]	Gás de Síntese Produzido [Nm³/dia]
Caso 1 – 5.000	KX-300SB	1	3.600,00	0,04	7.200,00
	JXQ-30B	1	264,96		529,92
Caso 2 – 10.000	KX-600SB	1	7.200,00	50,00	14.400,00
	JXQ-30B	1	360,00		720,00
	JXQ-10A	1	120,00		240,00
Caso 3 – 20.000	KX-1200SB	1	14.400,00	0,16	28.800,00
	KX-100SB	1	1.059,84		2.120,00
Caso 4 – 50.000	KX-1500SB	2	36.000,00	0,16	72.000,00
	KX-300SB	1	2.649,84		5.300,00
Caso 5 – 100.000	KX-1500SB	4	72.000,00	0,32	144.000,00
	KX-100SB	1	1099,68		2.199,36
Caso 6 – 500.000	KX-1500SB	20	360.000,00	0,16	720.000,00
	KX-450SB	1	5.499,84		10.760,64

Fonte: Elaboração própria.

Os mesmos modelos de motores de combustão interna usados com biogás são projetados também para funcionarem com gás de síntese, em condições de operar de forma contínua 24 h/dia por 7 dias na semana com carga total. A Tabela 17 mostra as principais características dos modelos escolhidos e os ajustes necessários para que o grupo gerador atingisse a potência de catálogo com a composição do gás de síntese produzido.

Tabela 17 – Especificações técnicas dos motores de combustão interna a gás de síntese

Modelo	Eficiência Elétrica (η_{emci}) [%]	Potência Elétrica [kW]	Consumo de Gás de Síntese [Nm³/h]	Consumo de Gás de Síntese Ajustado [Nm³/h]
GMWM30	11,50	20	23,00	53,61
GMWM50	12,83	32	33,00	76,92
GMWM80	13,23	55	55,00	128,20
GMWM120	13,23	75	75,00	174,82
GSCA250	17,49	160	121,00	282,04

GSCA330	16,96	200	156,00	363,62
GSCA420	17,31	250	191,00	445,20

Fonte: Elaboração própria baseado em ER-BR (2023).

Tendo os valores ajustado de consumo de gás de síntese dos grupos geradores para atingir a potência elétrica de catálogo, foi possível determinar quais modelos e as suas respectivas quantidades, visando o maior aproveitamento do gás de síntese produzido, como pode ser visto na Tabela 18.

Tabela 18 – Seleção de motores de combustão interna a gás de síntese e suas quantidades, consumo de gás de síntese e geração de energia elétrica

Casos por			Gás de	Gás de	Energia
Porte	Modelo	Quant.	Síntese	Síntese Não	Elétrica
Populacional		[und.]	Consumido	Consumido	Gerada
[hab.]			[Nm³/dia]	[Nm³/dia]	[kWh/dia]
Caso 1 – 5.000	GSCA250	1	6.768,88	961,04	3.840
Caso 2 – 10.000	GSCA420	1	10.684,76	479,65	6.000
	GMWM120	1	4.195,59		1.800
Caso 3 – 20.000	GSCA420	2	21.369,52	823,34	12.000
	GSCA330	1	8.726,82		4.800
Caso 4 – 50.000	GSCA420	7	74.793,32	660,78	42.000
	GMWM50	1	1.846,06		768
Caso 5 – 100.000	GSCA420	13	138.901,88	528,60	78.000
	GSCA250	1	6.768,88		3.840
Caso 6 – 500.000	GSCA420	68	726.563,69	1,36	408.000
	GMWM120	1	4.195,59		1.800

Fonte: Elaboração própria.

4.1.3 Resultado Energético

Na Tabela 19 pode-se observar o consumo médio de eletricidade do poder público municipal ($\dot{E}_{ConsPP}$) com base na quantidade média de instalações no município por cada caso, como foi apresentado na Tabela 7, também a energia elétrica gerada com uso do biogás ($\dot{E}_{Biogás}$), a energia elétrica gerada com uso do gás de

síntese ($\dot{E}_{syngas}$), o total de energia elétrica gerada ($\dot{E}_{Total}$). Para os resultados anualizado de geração de energia elétrica, foram considerados 330 dias de operação, 24 horas/dia, resultando em 7.920 horas/ano, e 35 dias em manutenção, nos quais não houve geração. O cálculo energético foi realizado subtraindo o consumo médio de eletricidade do poder público municipal ($\dot{E}_{ConsPP}$) do total de energia elétrica gerada ($\dot{E}_{Total}$). Se o resultado do cálculo for positivo, indica que há excedente energético sinalizado pela palavra “venda”, caso for negativo, indica a necessidade de compra de energia sinalizado pela palavra “compra”.

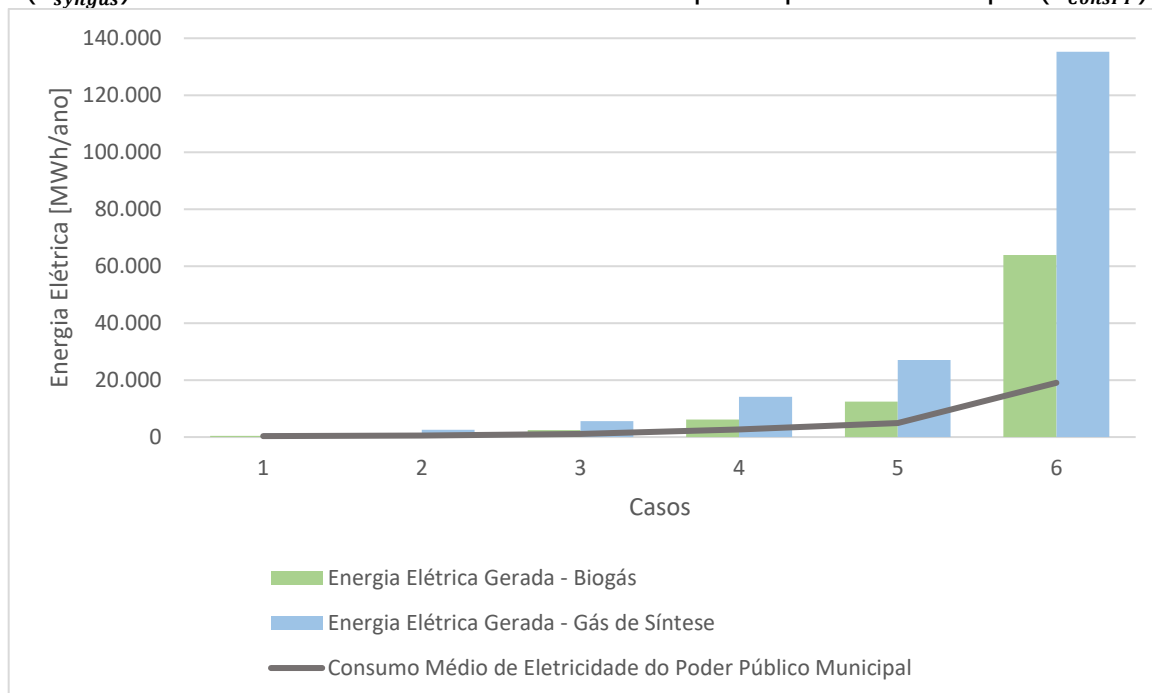
Tabela 19 – Resultado energético da central de utilidades

Casos por Porte Populacional [hab.]	$\dot{E}_{ConsPP}$ [MWh/ano]	$\dot{E}_{Biogás}$ [MWh/ano]	$\dot{E}_{syngas}$ [MWh/ano]	$\dot{E}_{Total}$ [MWh/ano]	Cálculo Energético [MWh/ano]	Compra ou Venda
Caso 1 - 5.000	339,29	435,60	1.267,20	1.702,80	1.363,51	Venda
Caso 2 - 10.000	504,03	1.267,20	2.574,00	3.841,20	3.337,17	Venda
Caso 3 - 20.000	1.129,04	2.415,60	5.544,00	7.959,60	6.830,56	Venda
Caso 4 - 50.000	2.695,21	6.193,44	14.113,44	20.306,88	17.611,67	Venda
Caso 5 - 100.000	4.926,78	12.474,00	27.007,20	39.481,20	34.554,42	Venda
Caso 6 - 500.000	19.044,00	63.954,00	135.234,00	199.188,00	180.144,00	Venda

Fonte: Elaboração própria.

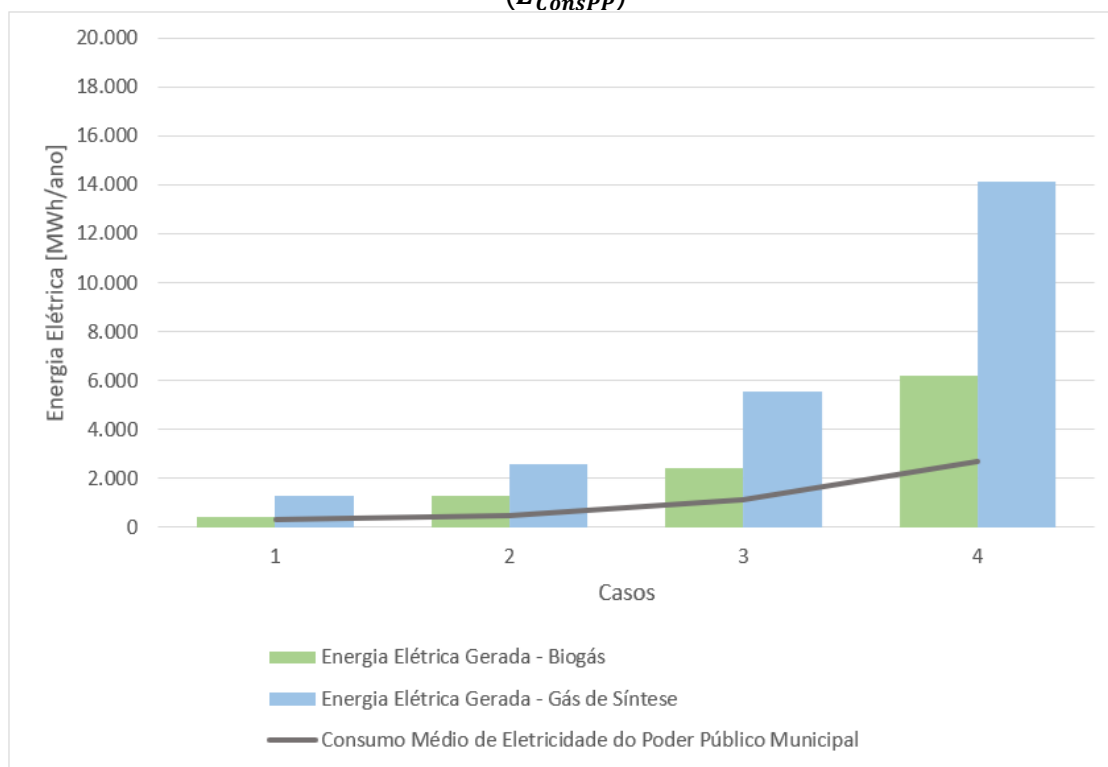
A Figura 16 mostra a geração de energia elétrica através do biogás ($\dot{E}_{Biogás}$) e gás de síntese ($\dot{E}_{syngas}$) comparado com o consumo médio de eletricidade do poder público municipal ($\dot{E}_{ConsPP}$) em cada caso estudo.

Figura 16.a - Energia elétrica gerada através do biogás ($\dot{E}_{Biogás}$) e gás de síntese ($\dot{E}_{syngas}$) vs. Consumo médio de eletricidade do poder público municipal ($\dot{E}_{ConsPP}$)



Fonte: Elaboração própria.

Figura 16.b – Detalhe - Energia elétrica gerada através do biogás ($\dot{E}_{Biogás}$) e gás de síntese ($\dot{E}_{syngas}$) vs. Consumo médio de eletricidade do poder público municipal ($\dot{E}_{ConsPP}$)



Fonte: Elaboração própria.

A recuperação energética de resíduos urbanos permite com que municípios brasileiros possam alcançar a autonomia elétrica nas instalações do poder público de controle direto, corroborando com a diminuição da quantidade de resíduos que são destinados para aterros sanitários, gerando de forma indireta uma diminuição nos gastos públicos com esse transbordo e também um aumento significativo da vida útil deles; além de evitar as destinações finais inadequadas que ainda são elevadas no Brasil, sendo elas os aterros controlados e lixões.

4.1.3.1 Aplicabilidade do Excedente Energético

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 18, pode-se verificar em que todos os casos analisados há excedente energético, o qual pode ter aplicações e/ou usos distintos; nesse estudo é abordado a venda.

A venda de excedente tem como base a resolução normativa da ANEEL nº 1.059, de 7 de fevereiro do ano 2023 (ANEEL, 2023), a qual possibilita a implementação de geração distribuída e a venda de excedente de energia no Mercado Livre de Energia.

O retorno financeiro com a venda do excedente de energia elétrica torna-se uma variável importante para que o investimento realizado inicialmente seja pago e assim fazendo com que após quitar esse débito possa ter recursos que podem ser usados em prol das necessidades do município.

Os resultados da análise econômica a serem apresentados no item 4.2 levam em consideração a venda do excedente energético.

4.1.4 Transesterificação e Biodiesel

Diferentes dos outros resíduos, o óleo de cozinha usado é gerado em uma escala muito menor, tendo um valor aproximado de 0,056 L/hab.dia. Na Tabela 20 pode-se observar os valores médios diário de geração de óleo de cozinha usado e ao aplicar a Equação 15 tem-se o resultado de biodiesel diário e também seu valor anualizado.

Tabela 20 – Geração média estimada de óleo residual e produção média estimada de biodiesel

Casos por Porte Populacional [hab.]	Óleos Residuais [L/dia]	Biodiesel Produzido [L/dia]	Biodiesel Produzido [L/ano]
Caso 1 - 5.000	280	260,4	95.046
Caso 2 - 10.000	560	521	190.165
Caso 3 - 20.000	1.120	1.042	380.330
Caso 4 - 50.000	2.800	2.604	950.460
Caso 5 - 100.000	5.600	5.208	2.044.000
Caso 6 - 500.000	28.000	26.040	9.504.600

Fonte: Elaboração própria.

4.2 Resultados e Discussões da Análise Econômica

Tomando como as populações a serem consideradas para os cálculos o valor limite máximo de cada caso por porte populacional, temos assim: 5.000, 10.000, 20.000, 50.000, 100.000 e 500.000 habitantes, na Tabela 21 pode-se observar o investimento realizado em cada caso.

Tabela 21 - Investimentos realizados em cada caso analisado

Casos por Porte Populacional [hab.]	Gaseificador [US\$]	MCI a Gás de Síntese [US\$]	Biodigestor [US\$]	MCI a Biogás [US\$]	Total Investido [US\$]
Caso 1 - 5.000	299.750,00	87.200,00	5.498,24	29.975,00	422.423,24
Caso 2 - 10.000	580.425,00	177.125,00	10.996,49	87.200,00	855.746,49
Caso 3 - 20.000	1.171.750,00	381.500,00	21.992,97	166.225,00	1.741.467,97
Caso 4 - 50.000	2.997.500,00	971.190,00	58.647,93	426.190,00	4.453.527,93
Caso 5 - 100.000	5.531.750,00	1.858.450,00	115.463,11	858.375,00	8.364.038,11
Caso 6 - 500.000	27.658.750,00	9.305.875,00	527.831,37	4.400.875,00	41.893.331,37

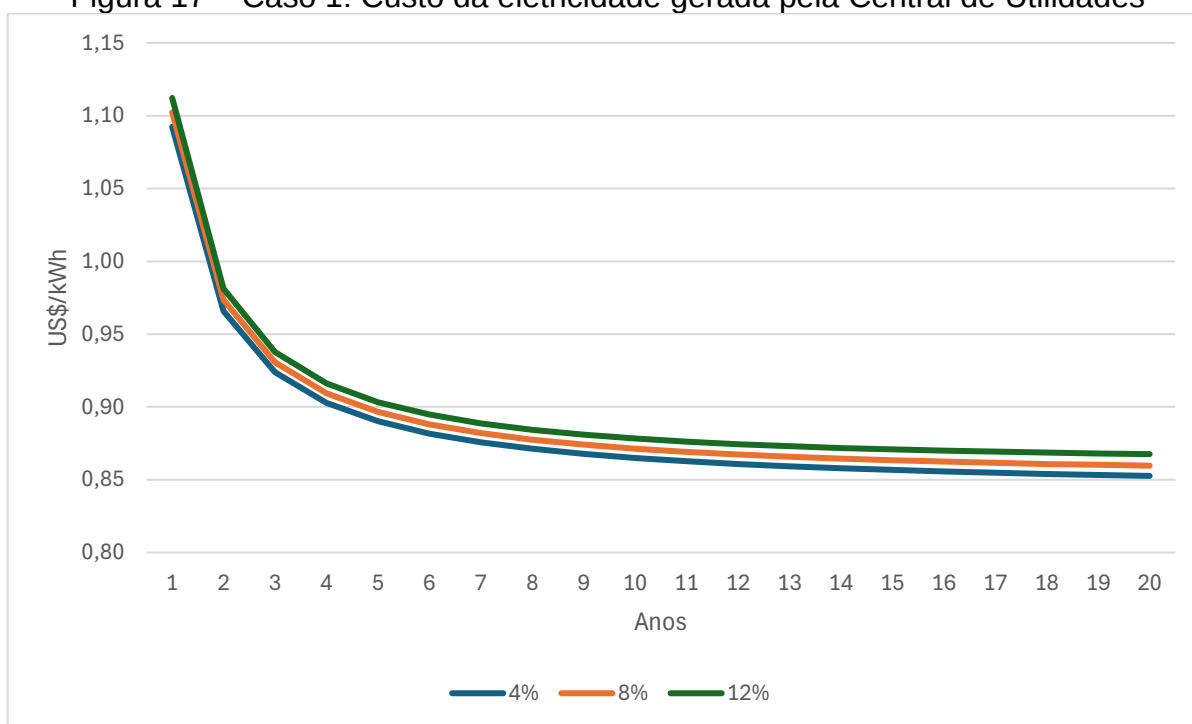
Fonte: Elaboração própria.

As Figuras 17, 19, 21, 23, 25 e 27 apresentam os resultados econômicos dos Casos 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente, onde pode-se observar o custo de energia elétrica variando em um período de 20 anos de operação da Central de Utilidades. Sabendo que o valor de referência da tarifa de energia elétrica é 0,18 US\$/kWh, pode-se constatar que apenas os Casos 5 e 6 (Figuras 25 e 27), o valor da energia elétrica gerada é menor ao longo dos anos de operação.

As Figuras 18, 20, 22, 24, 26 e 28 mostram os resultados econômicos dos Casos 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente, relacionados à receita anual esperada pela eletricidade gerada (*payback*) em 20 anos, considerando a venda do excedente de energia elétrica no Mercado Livre de Energia. É possível observar que apenas os Casos 5 e 6 (Figuras 26 e 28) são economicamente viáveis, ou seja, o investimento inicial realizado é pago e passa a gerar lucro para o município.

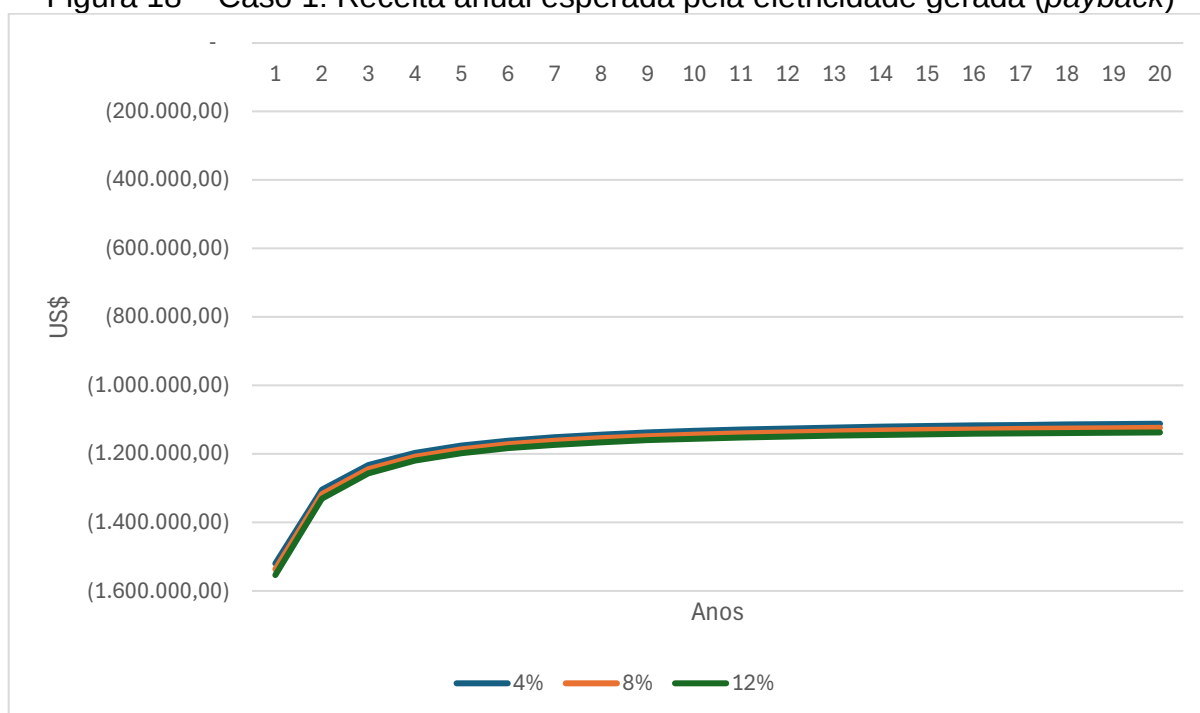
O Caso 4 (Figuras 23 e 24) apresenta resultados interessantes em relação aos Casos 1, 2 e 3, pois apesar de não apresentar viabilidade econômica, os valores encontrados demonstram que depender do cenário econômico em que se encontra é possível alcançar a viabilidade econômica. Este caso também auxilia a compreensão de qual seja o tamanho mínimo, do ponto de vista populacional, de um município brasileiro para que haja viabilidade econômica para o formato de Central de Utilidades proposto.

Figura 17 – Caso 1: Custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades



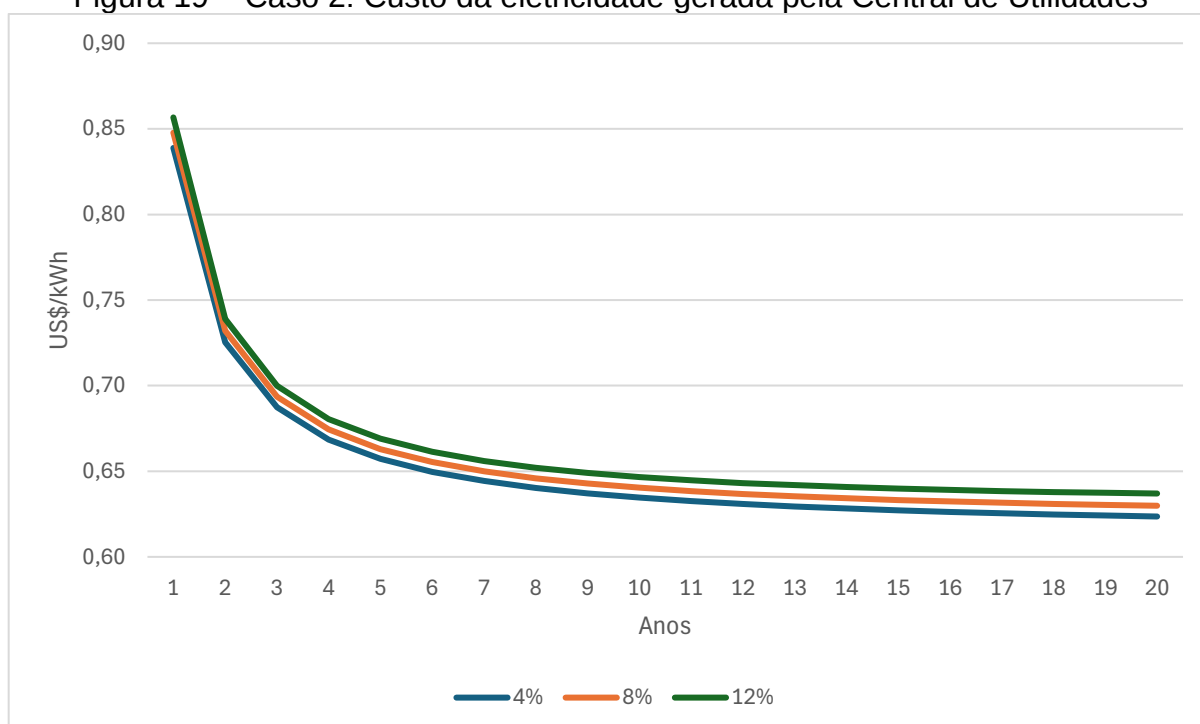
Fonte: Elaboração própria.

Figura 18 – Caso 1: Receita anual esperada pela eletricidade gerada (*payback*)



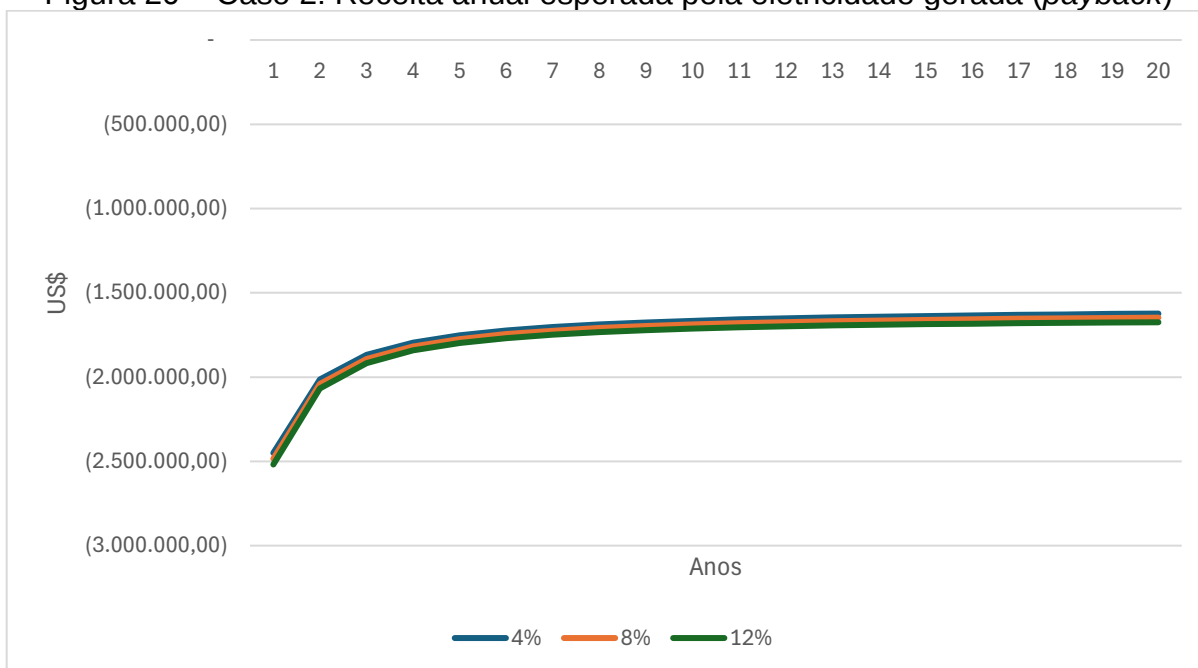
Fonte: Elaboração própria.

Figura 19 – Caso 2: Custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades



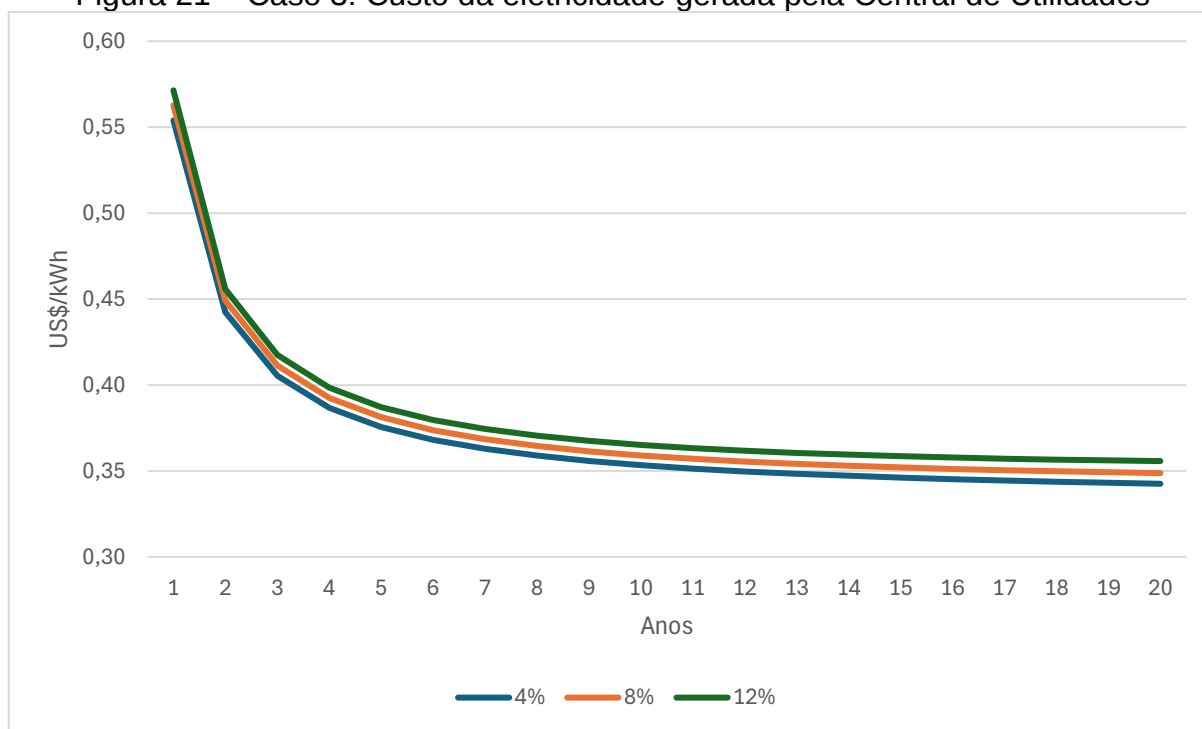
Fonte: Elaboração própria.

Figura 20 – Caso 2: Receita anual esperada pela eletricidade gerada (*payback*)



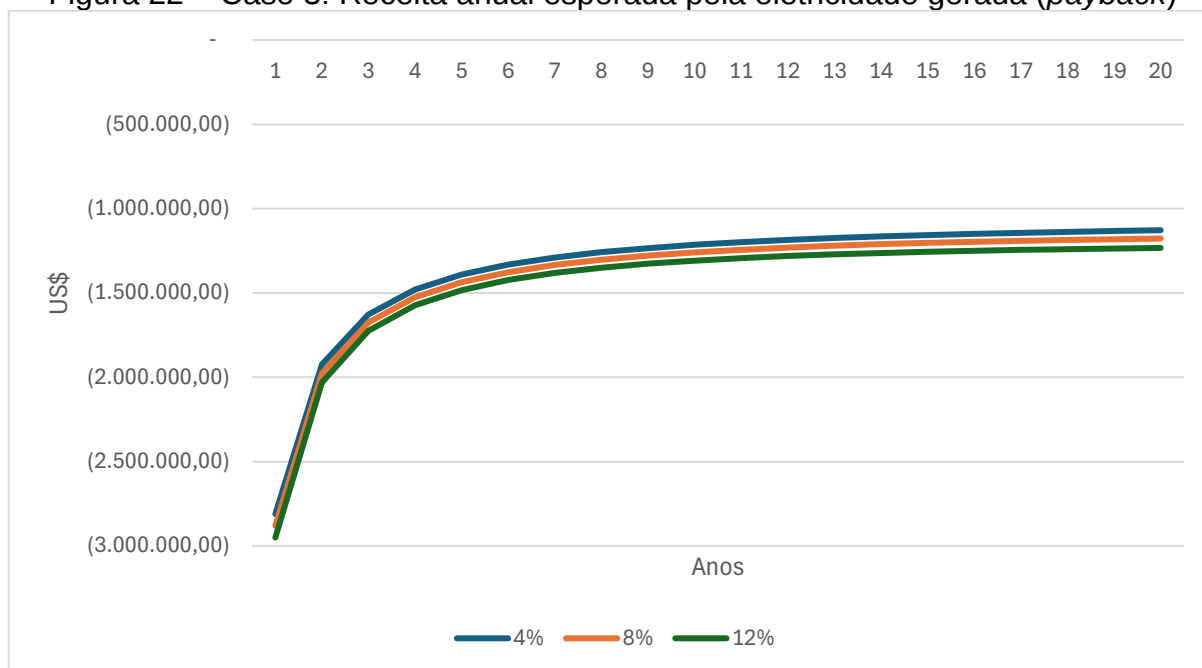
Fonte: Elaboração própria.

Figura 21 – Caso 3: Custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades



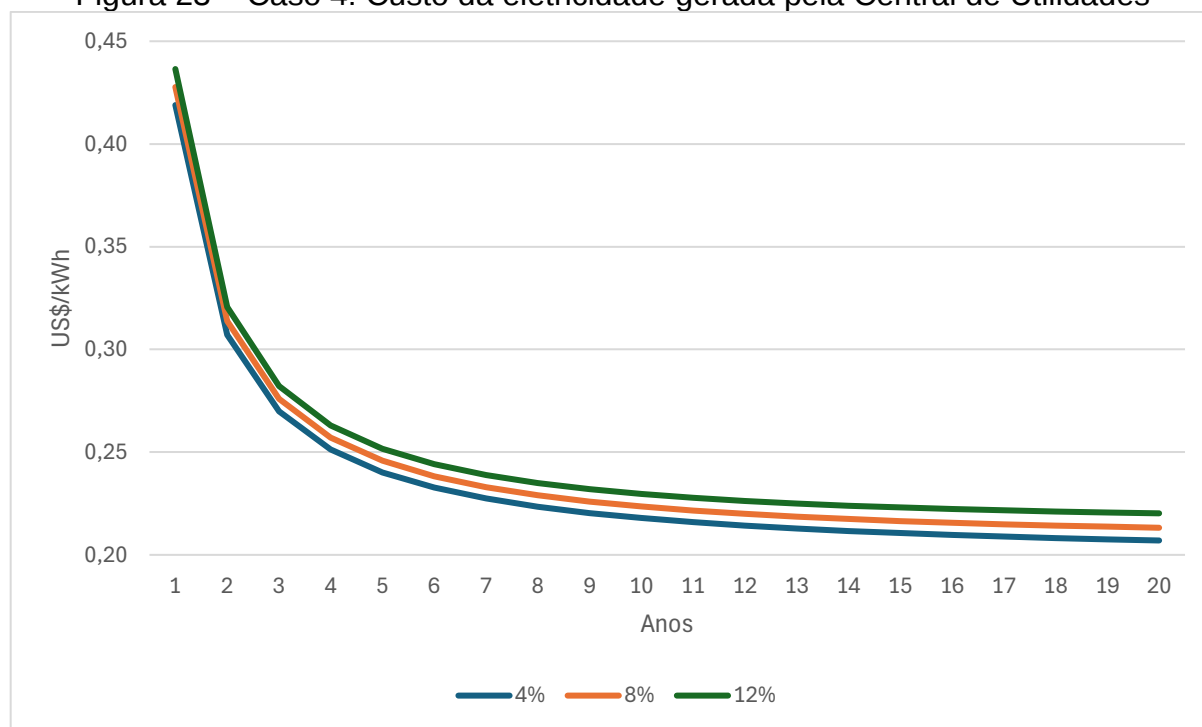
Fonte: Elaboração própria.

Figura 22 – Caso 3: Receita anual esperada pela eletricidade gerada (*payback*)



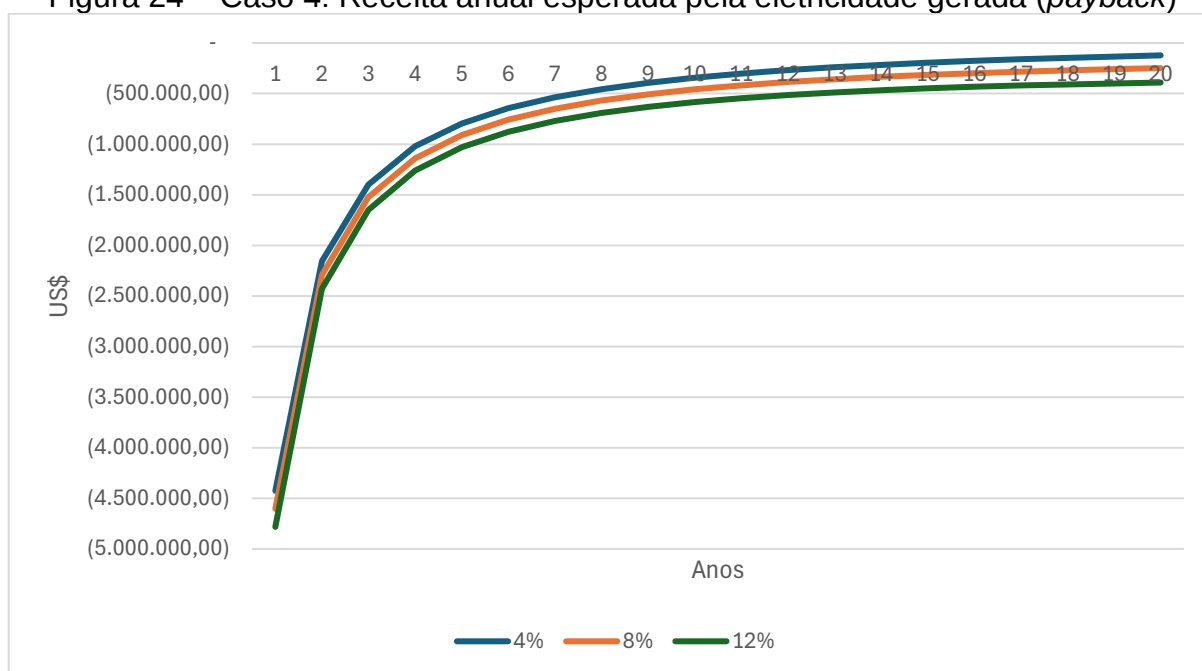
Fonte: Elaboração própria.

Figura 23 – Caso 4: Custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades



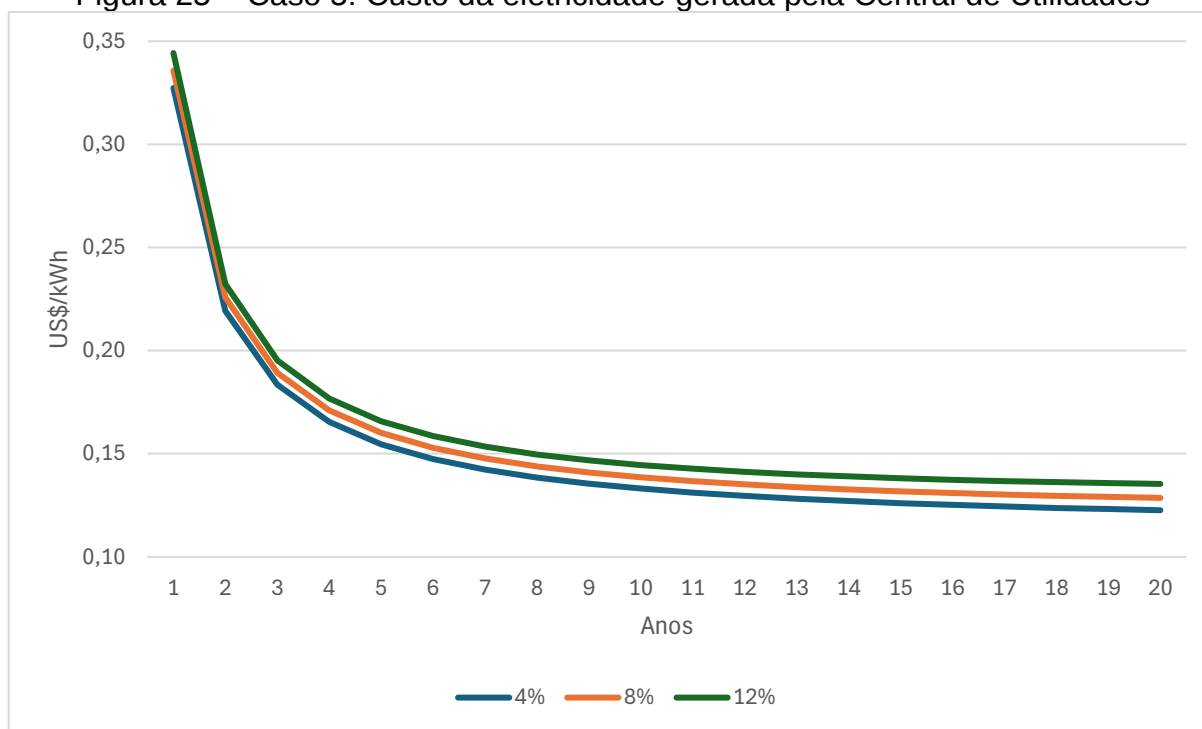
Fonte: Elaboração própria.

Figura 24 – Caso 4: Receita anual esperada pela eletricidade gerada (*payback*)



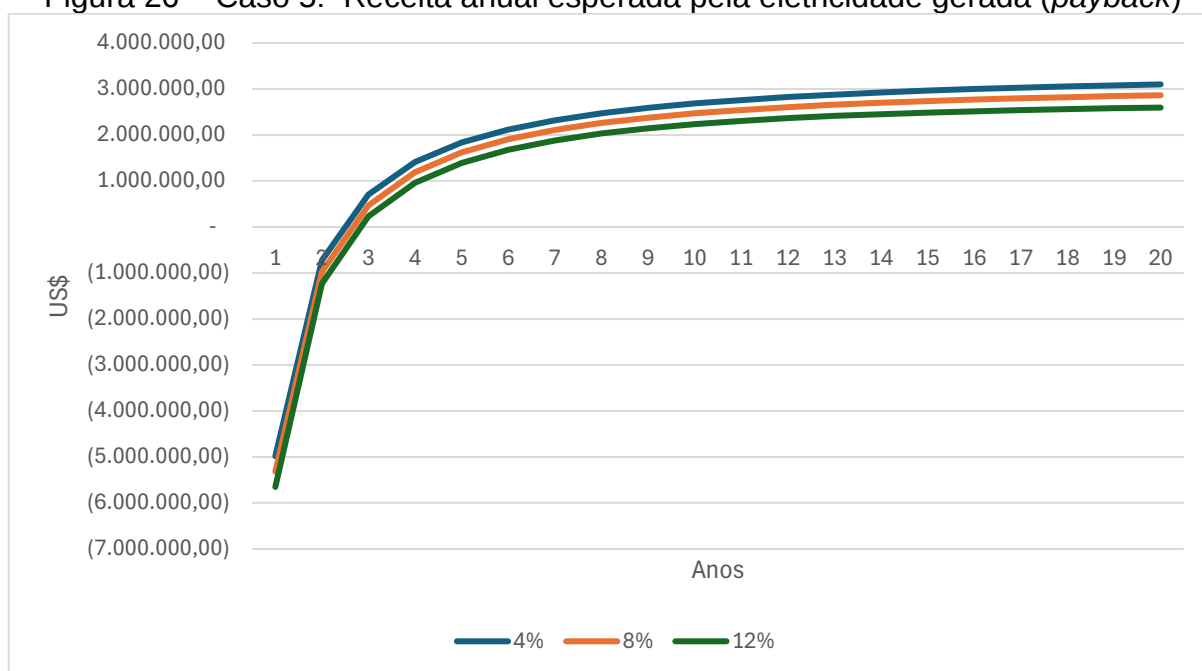
Fonte: Elaboração própria.

Figura 25 – Caso 5: Custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades



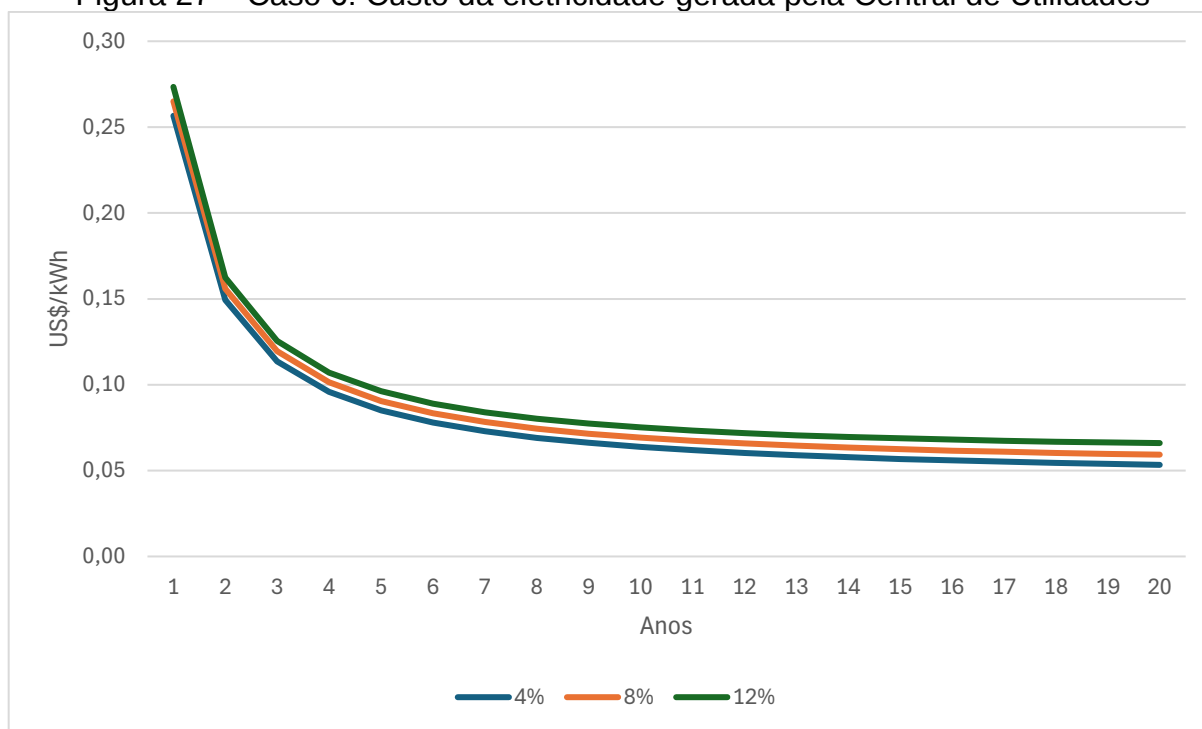
Fonte: Elaboração própria.

Figura 26 – Caso 5: Receita anual esperada pela eletricidade gerada (*payback*)

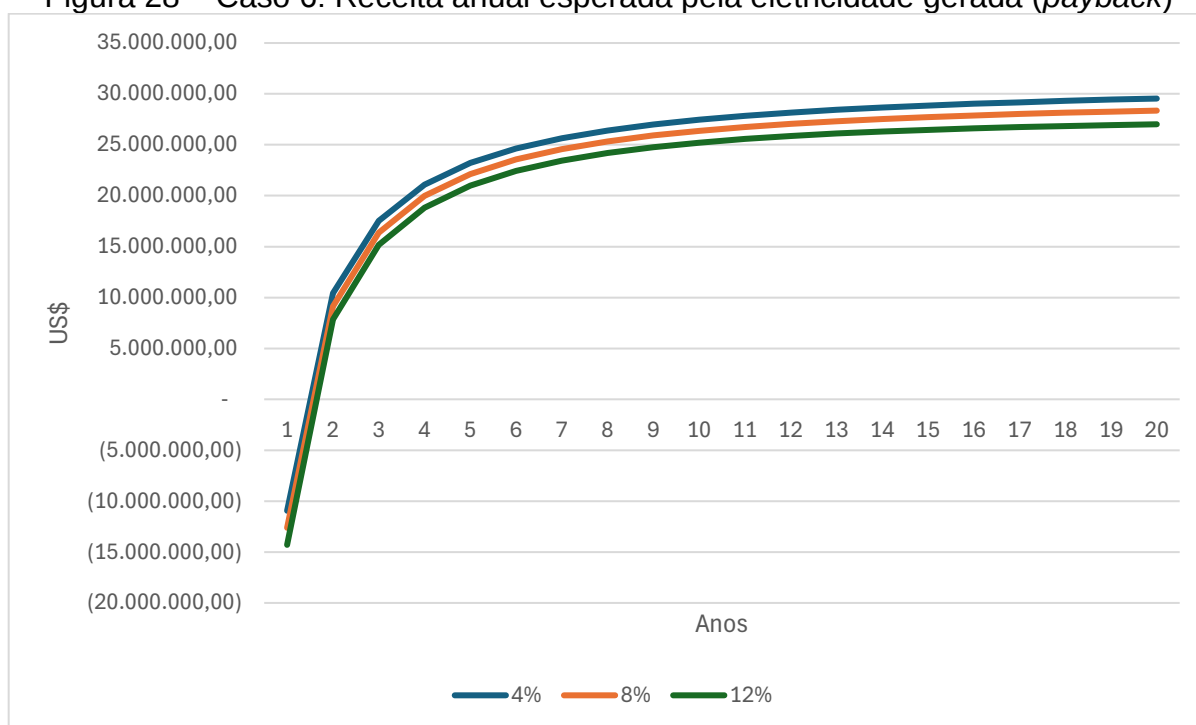


Fonte: Elaboração própria.

Figura 27 – Caso 6: Custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades



Fonte: Elaboração própria.

Figura 28 – Caso 6: Receita anual esperada pela eletricidade gerada (*payback*)

Fonte: Elaboração própria.

Quanto a economia anual esperada pela utilização do biodiesel, sabendo-se que o valor médio do diesel S-10 é de 1,10 US\$/L e que o custo aproximado para a produção do biodiesel é de 0,15 US\$/L, desconsiderando investimentos, pode-se estimar que os valores aproximados que os municípios economizarão com combustível para suas frotas, demonstrados na Tabela 22.

Tabela 22 – Economia anual esperada pela utilização do Biodiesel

Casos por Porte	Biodiesel Produzido	Economia Estimada
Populacional [hab.]	[L/ano]	[US\$/ano]
Caso 1 - 5.000	95.046	90.293,70
Caso 2 - 10.000	190.165	180.656,75
Caso 3 - 20.000	380.330	361.313,50
Caso 4 - 50.000	950.460	902.937,00
Caso 5 - 100.000	2.044.000	1.941.800,00
Caso 6 - 500.000	9.504.600	9.029.370,00

Fonte: Elaboração própria.

4.3 Resultados e Discussões da Análise Ambiental

A análise ambiental proporciona resultados capazes de mensurar os possíveis impactos ambientais que determinada tecnologia usada para geração de energia pode causar. Aplicando a Equação 18 são obtidos os indicadores de poluição (Π_p) de cada combustível, que podem ser observados na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados dos indicadores de poluição	
Combustível	Indicador de Poluição (Π_p) [kgCO ₂ /MJ]
Gás de Síntese	0,083645736
Biogás	0,148372502
Biodiesel	0,091935484

Fonte: Elaboração própria.

Aplicando a Equação 17, obtém-se os resultados do indicador de eficiência ecológica (ϵ) do gás de síntese, biogás e biodiesel operando em motor de combustão interna podem ser vistos na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados dos indicadores de eficiência ecológica	
Combustível usado em Motor de Combustão Interna	Indicador de Eficiência Ecológica (ϵ)
Gás de Síntese	0,469298122
Biogás	0,495302406
Biodiesel	0,650376630

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados obtidos dos indicadores de eficiência ecológica apontam para o biodiesel como sendo o combustível com maior eficiência dentre os três avaliados, contudo, é importante ressaltar que a aplicação proposta para ele neste contexto é para ser utilizado diretamente na frota municipal de veículos, sendo assim, a eficiência considerada para seu cálculo é a eficiência térmica. Já o gás de síntese e biogás foram aplicados para geração de eletricidade, onde além de estar implícito a consideração da eficiência térmica do motor de combustão interna, foi considerada

para cálculo a eficiência elétrica do grupo gerador, que é baixa, fazendo com que o resultado do indicador seja menor.

5 ESTUDO DE CASO

Foi realizado um estudo de caso na cidade de Guaratinguetá, localizada no Vale do Paraíba no estado de São Paulo, para que fosse aplicado de forma direcionada o modelo geral desenvolvido. Na Figura 29 pode-se observar a localização geográfica da cidade de Guaratinguetá no mapa do Brasil.

Figura 29 - Mapa de localização da cidade de Guaratinguetá



Fonte: Wikipédia (2023).

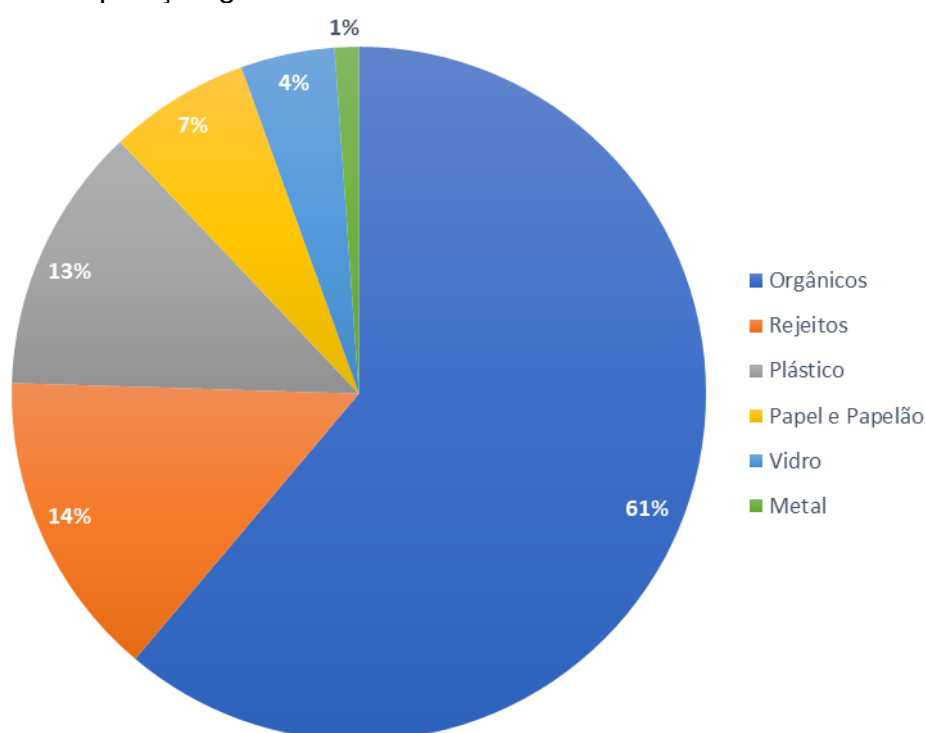
Na Tabela 25 abaixo pode-se observar os dados de população, quantidade de instalações e o gasto anual de eletricidade do poder público e as estimativas de quantidades de resíduos sólidos urbanos (0,684 kg/hab.dia), (lodo 0,708 kg/hab.dia) e óleos residuais (0,056 L/hab.dia) gerados. Na Figura 30 observa-se a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Guaratinguetá, os quais predominantemente são orgânicos.

Tabela 25 - Dados sobre o município de Guaratinguetá

População [hab.]	Instalações do Poder Público [und.]	Gasto com Energia Elétrica [MWh/ano]	Resíduos Sólido Urbano [kg/dia]	Lodo de ETE e ETA [kg/dia]	Óleo Residual [L/dia]
123.192	361	10.488	84.263,33	87.219,94	6.898,75

Fonte: Elaboração própria baseado em Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021), Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente (2020), Prefeitura Municipal da Estância Turística de Guaratinguetá (2016) e (2019), Aguiar *et al.* (2022) e Brasil (2022).

Figura 30 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos de Guaratinguetá



Fonte: Elaboração própria baseado em Prefeitura Municipal da Estância Turística de Guaratinguetá (2019).

Em posse dos dados cima, aplicou-se a metodologia descrita no Capítulo 3, para a obtenção dos resultados demonstrados a seguir.

Foi definida a mistura do substrato na proporção 60:40 (lodo:fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos) para digestão anaeróbia, sendo o lodo (parcial) a ser utilizado na quantidade de 0,450 kg/hab.dia e a fração orgânica (parcial) de 0,300 kg/hab.dia, como pode ser observado na Tabela 26.

As quantidades restantes de lodo e matéria orgânica serão destinados para mistura combustível a ser usada no processo de gaseificação.

Tabela 26 - Geração média estimada de lodo (parcial) e da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (parcial) diários para Guaratinguetá

População [hab.]	Lodo de ETE e ETA [kg/dia]	Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos [kg/dia]	Mistura (60:40) [kg/dia]
123.192	55.436	36.958	92.394

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 27 foi demonstrado as dimensões e quantidades dos biodigestores de lagoa coberta, qual o tempo de retenção do substrato e a estimativa de produção de biogás para o município.

Tabela 27 – Dimensionamento dos biodigestores e suas quantidades, tempo de retenção e produção de biogás estimada para Guaratinguetá

Dimensões do biodigestor (C x L x P) [m]	Quant. [und.]	Tempo de Retenção Hidráulica [dias]	Total de Biogás Gerado [Nm³/dia]
16 x 8 x 4	6	40	13.744,00

Fonte: Elaboração própria.

Tendo os valores ajustado de consumo de biogás dos grupos geradores para atingir a potência elétrica de catálogo (Tabela 10), foi possível determinar quais modelos e as suas respectivas quantidades, visando o maior aproveitamento do biogás gerado, como pode ser visto na Tabela 28.

Tabela 28 – Seleção de motores de combustão interna a biogás e suas quantidades, consumo de biogás e geração de energia elétrica para Guaratinguetá

Modelo	Quant. [und.]	Biogás Consumido [Nm³/dia]	Biogás Não Consumido [Nm³/dia]	Energia Elétrica Gerada [kWh/dia]
GSCA420	5	12.853,26	144,86	30.000
GMWM80	1	745,49		1.320

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 29 pode-se observar as quantidades geradas por habitante diariamente de lodo (parcial) equivalente a 0,258 kg/hab.dia e fração orgânica (parcial)

equivalendo a 0,117 kg/hab.dia, valores esses que são referentes as partes restantes de ambos os resíduos, tendo sido as outras partes utilizadas na mistura para digestão anaeróbia, plástico equivalendo a 0,089 kg/hab.dia, papel e papelão equivalendo a 0,048 kg/hab.dia. A mistura combustível a ser usado é composta integralmente pelos resíduos e quantidades mencionadas.

Tabela 29 – Geração média estimada de lodo (parcial), fração orgânica (parcial), plástico, papel e papelão e mistura combustível para Guaratinguetá

População [hab.]	Lodo de ETE e ETA [kg/dia]	Fração Orgânica [kg/dia]	Plástico [kg/dia]	Papel e Papelão [kg/dia]	Mistura Combustível [kg/dia]
123.192	31.784	14.413	10.964	5.913	63.074

Fonte: Elaboração própria.

A partir desses dados foi possível determinar a quantidade de mistura combustível diária, que pode ser observada na Tabela 29. Na Tabela 15 pode-se observar as especificações dos modelos de gaseificadores de leito fluidizado da marca Kexin e assim sabendo as quantidades de mistura combustível e tendo disponível as informações técnicas dos diferentes gaseificadores, determinou-se quais modelos eram mais adequados para cada caso do município e as suas quantidades, o consumo de mistura combustível para produção de gás de síntese e quanto dele foi produzido, como pode ser visto na Tabela 30.

Tabela 30 – Seleção de gaseificadores de leito fluidizado e suas quantidades, consumo de mistura combustível e produção de gás de síntese para Guaratinguetá

Modelo	Quant. [und.]	Mistura Consumida [kg/dia]	Mistura Não Consumida [kg/dia]	Gás de Síntese Produzido [Nm³/dia]
KX-1500SB	3	54.000	1.154	108.000
KX-750SB	1	7.920		18.000

Fonte: Elaboração própria.

Tendo os valores ajustado de consumo de gás de síntese dos grupos geradores para atingir a potência elétrica de catálogo (Tabela 17), foi possível determinar quais modelos e as suas respectivas quantidades, visando o maior aproveitamento do gás de síntese produzido, como pode ser visto na Tabela 31.

Tabela 31 – Seleção de motores de combustão interna a gás de síntese e suas quantidades, consumo de gás de síntese e geração de energia elétrica para Guaratinguetá

Modelo	Quant. [und.]	Gás de Síntese Consumido [Nm³/dia]	Gás de Síntese Não Consumido [Nm³/dia]	Energia Elétrica Gerada [kWh/dia]
GSCA420	10	106.847,60		60.000
GSCA330	2	17.453,64	1.698,76	9.600

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 32 pode-se observar a quantidade de instalações do poder público municipal (Q_{Inst}) e o seu consumo de eletricidade ($\dot{E}_{ConsPP}$), a energia elétrica gerada com uso do biogás ($\dot{E}_{Biogás}$), a energia elétrica gerada com uso do gás de síntese ($\dot{E}_{syngas}$) e o total de energia elétrica gerada ($\dot{E}_{Total}$). Para os resultados anualizado de geração de energia elétrica, foram considerados 330 dias de operação, 24 horas/dia, resultando em 7.920 horas/ano, e 35 dias em manutenção, nos quais não houve geração. O cálculo energético foi realizado subtraindo o consumo de eletricidade do poder público municipal ($\dot{E}_{ConsPP}$) do total de energia elétrica gerada ($\dot{E}_{Total}$). Se o resultado do cálculo for positivo, indica que há excedente energético sinalizado pela palavra “venda”, caso for negativo, indica a necessidade de compra de energia sinalizado pela palavra “compra”; sendo a venda excedente amparada pela lei como descrito anteriormente.

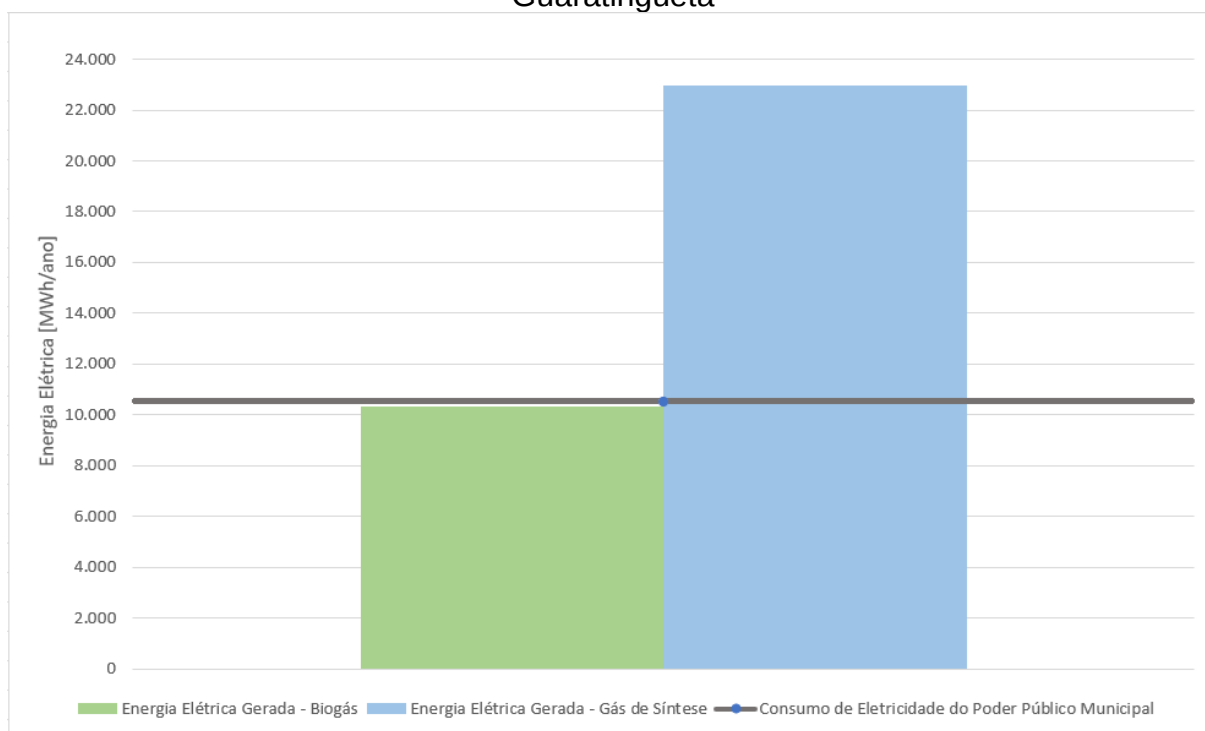
Tabela 32 – Cálculo energético da central de utilidades para Guaratinguetá

Q_{Inst} [und.]	$\dot{E}_{ConsPP}$ [MWh/ano]	$\dot{E}_{Biogás}$ [MWh/ano]	$\dot{E}_{syngas}$ [MWh/ano]	$\dot{E}_{Total}$ [MWh/ano]	Cálculo Energético [MWh/ano]	Compra ou Venda
361	10.488,00	10.335,60	22.968,00	33.303,60	22.815,60	Venda

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 31 mostra a geração de energia elétrica através do biogás ($\dot{E}_{Biogás}$) e gás de síntese ($\dot{E}_{syngas}$) comparado com o consumo de eletricidade do poder público municipal ($\dot{E}_{ConsPP}$) na cidade de Guaratinguetá.

Figura 31 - Energia elétrica gerada através do biogás ($\dot{E}_{Biogás}$) e gás de síntese ($\dot{E}_{syngas}$) vs. Consumo médio de eletricidade do poder público municipal ($\dot{E}_{ConsPP}$) para Guaratinguetá



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 33 pode-se observar os valores diário de geração de óleo de cozinha usado e de biodiesel e seu valor anualizado para a cidade de Guaratinguetá.

Tabela 33 – Geração estimada de óleo residual e produção de biodiesel para Guaratinguetá

Óleos Residuais [L/dia]	Biodiesel Produzido [L/dia]	Biodiesel Produzido [L/ano]
6.898,75	6415,8375	2.341.781

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 34 pode-se observar os investimentos a serem feitos na cidade de Guaratinguetá para implantação da Central de Utilidades.

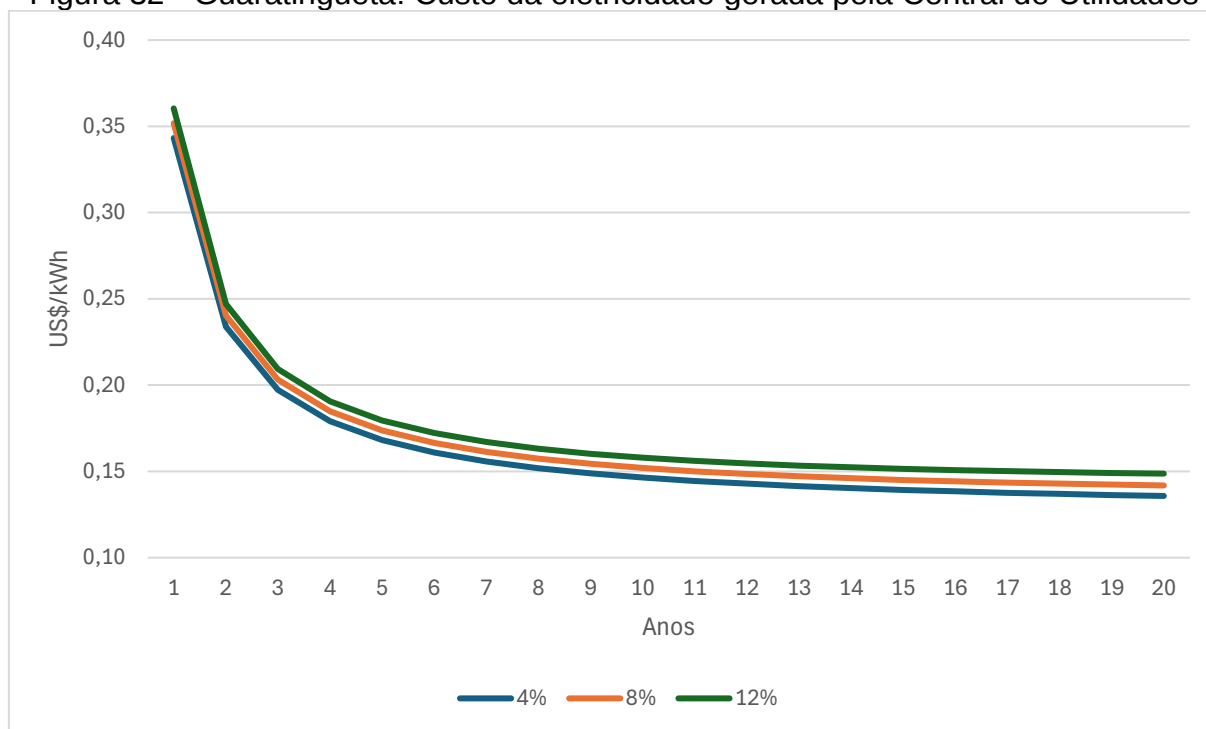
Tabela 34 - Investimentos realizados para Guaratinguetá

População [hab.]	Gaseificador [US\$]	MCI a Gás de Síntese [US\$]	Biodigestor [US\$]	MCI a Biogás [US\$]	Total Investido [US\$]
123.192	4.768.750,00	1.580.500,00	87.971,89	711.225,00	7.148.446,89

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 32 é apresentado o custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades, nos quais os valores variaram entre 0,36 e 0,14 US\$/kWh ao longo do período de 20 anos de operação, mas a partir do quarto ano, para as taxas de 4% e 8% ao ano, o custo da eletricidade gerada equivale à tarifa comercial da concessionária, no valor de 0,18 US\$/kWh, já para a taxa de 12% ao ano o mesmo custo é atingido no quinto ano.

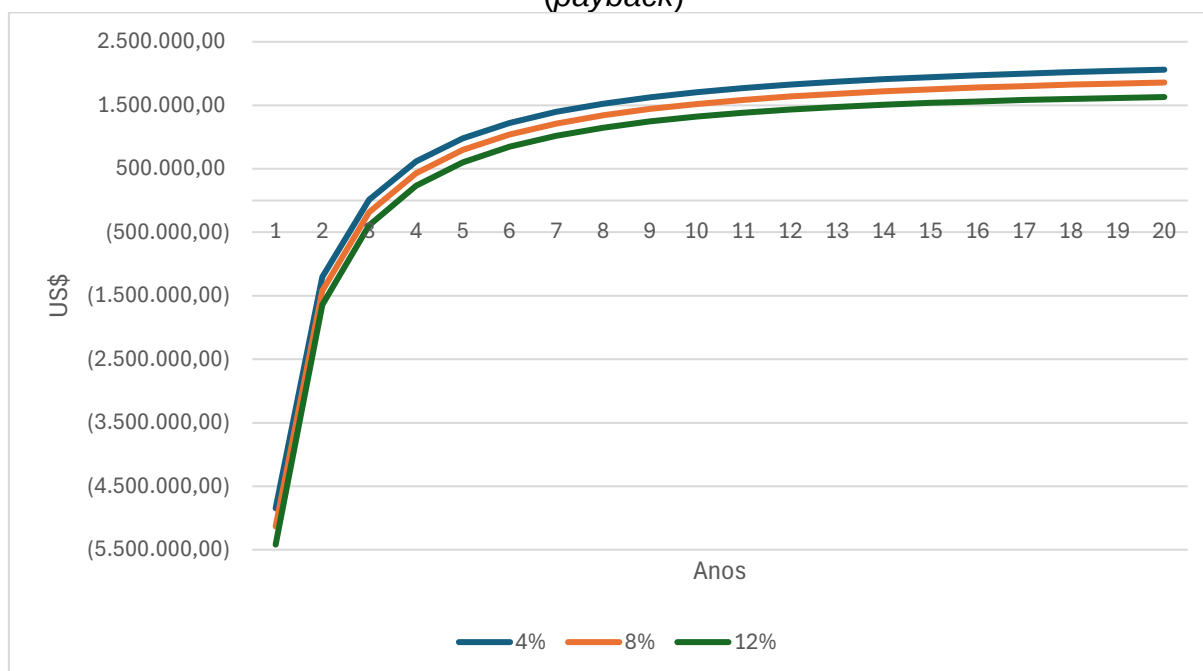
Figura 32 - Guaratinguetá: Custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 33 pode-se observar a receita anual esperada pela eletricidade gerada para o município de Guaratinguetá durante 20 anos de operação, ficando possível perceber que o investimento realizado é pago entre 3 e 4 anos, sendo que com uma taxa de 4% ao ano o investimento é pago no terceiro ano e com taxas de 8% e 12% ao ano o investimento é pago no quarto ano.

Figura 33 - Guaratinguetá: Receita anual esperada pela eletricidade gerada (payback)



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 35 tem-se o valor anual esperado a ser economizado pela utilização do biodiesel, sabendo-se que o valor médio do diesel S-10 é de 1,10 US\$/L e que o custo aproximado para a produção do biodiesel é de 0,15 US\$/L, desconsiderando investimentos.

Tabela 35 – Economia anual esperada pela utilização do Biodiesel

População [hab.]	Biodiesel Produzido [L/ano]	Economia Estimada [US\$/ano]
123.192	2.341.781	2.224.691,95

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 36 pode-se se ver os resultados obtidos para os indicadores de poluição em Guaratinguetá.

Tabela 36 – Guaratinguetá: Resultados dos indicadores de poluição

Combustível	Indicador de Poluição (Π_p) [kgCO ₂ /MJ]
Gás de Síntese	0,085652591
Biogás	0,155379826
Biodiesel	0,091935484

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados do indicador de eficiência ecológica para o caso de Guaratinguetá com o uso do gás de síntese, biogás e biodiesel operando em motor de combustão interna são vistos na Tabela 37.

Tabela 37 – Guaratinguetá: Resultados dos indicadores de eficiência ecológica	
Combustível usado em Motor de	Indicador de Eficiência
Combustão Interna	Ecológica (ϵ)
Gás de Síntese	0,461579708
Biogás	0,477352694
Biodiesel	0,637204050

Fonte: Elaboração própria.

6 CONCLUSÕES

Da análise energética realizada para municípios brasileiros de diferentes dinâmicas populacionais, conclui-se que a central de utilidades pode gerar eletricidade para o poder público municipal em excedente em todos os casos, gerando de 4 a 9 vezes mais que o necessário anualmente a depender do tamanho do município, o que faz com que seja viável a concessão da certificação *GBC Brasil Zero Energy*, constatando a sua viabilidade.

Quanto a aplicação do excedente energético, a venda dele possibilitou com que fosse diminuído o tempo para que o investimento fosse pago, acelerando e aumentando os lucros. Uma vez que o investimento for pago, o município passa a ter um fluxo positivo de entrada no caixa municipal, permitindo o investimento em melhorias para a população.

Em relação ao biodiesel, apesar de não haver dados que demonstrem o consumo pelo poder público nos municípios, as quantidades produzidas anualmente em todos os casos são expressivas e podem auxiliar na diminuição do consumo de diesel na frota municipal, possibilitando uma economia para os cofres dos municípios.

A respeito da análise econômica realizada para municípios brasileiros de diferentes dinâmicas populacionais, conclui-se que a proposta de Central de Utilidades é viável para municípios com pelo menos 100.000 habitantes, como pode ser observado nos Casos 5 e 6 e também no estudo de caso para a cidade de Guaratinguetá. O Caso 4 (50.000 habitantes) apresenta um resultado econômico próximo da viabilidade econômico, levando a concluir que em cidades com esse porte populacional pode ser que seja viável a depender de alguns fatores como taxa de juros anual, valor da tarifa de energia elétrica, entre outros. Importante ressaltar que municípios com mais de 50.000 e menos de 100.000 habitantes pode apresentar viabilidade econômica para a configuração proposta.

Ao considerar os 20 anos de operação, no Caso 5 o custo da eletricidade gerada pela Central de Utilidades variou entre 0,33 – 0,12 US\$/kWh a uma taxa de 4%, 0,34 – 0,13 US\$/kWh a uma taxa de 8% e 0,34 – 0,14 US\$/kWh a uma taxa de 12%, já no Caso 6 o custo da eletricidade gerada variou entre 0,26 – 0,05 US\$/kWh a uma taxa de 4%, 0,27 – 0,06 US\$/kWh a uma taxa de 8% e 0,27 – 0,07 US\$/kWh a uma taxa de 12%, podendo constatar que a taxa de juros não afetou substancialmente

os custos da eletricidade gerada, bem como as receitas (Figuras 26 e 28) nos casos 5 e 6.

Neste estudo, pode-se destacar que o custo da eletricidade (US\$/kWh) é o fator determinante da análise econômica, pois se o custo da eletricidade não for inferior ao valor praticado pela concessionária de energia elétrica, torna-se inviável.

Os resultados obtidos na análise econômica são fundamentais para determinar se um projeto tem potencial de execução ou não, podendo ser considerado o dado mais importante dentro da análise de um projeto.

A respeito da análise ambiental realizada para municípios brasileiros de diferentes dinâmicas populacionais, o biodiesel mostrou-se como sendo o combustível com maior eficiência ecológica em relação ao gás de síntese e biogás, contudo, é importante para o biodiesel foi avaliado apenas a eficiência térmica enquanto para o outros dois combustíveis também foi considerado a eficiência elétrica do gerado acoplado ao motor de combustão interna, o que faz com que os resultados de eficiência sejam menores. Os três combustíveis apresentaram resultados de eficiência ecológica superiores a 0,45.

Quanto a análise energética do estudo de caso para Guaratinguetá, conclui-se de igual forma a viabilidade da Central de Utilidades a qual gerou excedente 2 vezes superior ao consumido pelo poder público no município, sendo possível também a concessão da certificação *GBC Brasil Zero Energy*. Contudo, pode-se observar apesar de ter sido gerado excedente, foi menor que o observado no Caso 5 (100.000 habitantes), podendo sinalizar que o fator populacional apesar de ser importante, não é determinante, visto que cada município tem características específicas que podem alterar o resultado final.

De acordo com dados disponibilizados pela Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente (2020), o município de Guaratinguetá no ano de 2020 consumiu como um todo 62.715.000 L de diesel e a produção de biodiesel pela central de utilidades foi de 2.341.781, o que corresponde a 3,73% do consumido pelo município naquele ano.

Da análise econômica realizada do estudo de caso para Guaratinguetá, conclui-se que há viabilidade econômica para a execução da Central de Utilidades, sendo que o investimento feito é pago entre 3 e 4 anos, a depender da taxa de juros anual exercida. O custo da eletricidade gerada ao longo de 20 anos de operação ficou entre 0,34 – 0,14 US\$/kWh a uma taxa de juros de 4% ao ano, 0,35 – 0,14 US\$/kWh a uma taxa de juros de 8% ano e 0,36 – 0,15 US\$/kWh a uma taxa de 12%.

Quanto a receita anual esperada, o retorno é expressivo nos primeiros 10 anos, contudo a partir do décimo primeiro ano os ganhos passam a ser mais lineares e a diferença de um ano para o outro torna-se menor.

Relativo à análise ambiental do estudo de caso de Guaratinguetá, os resultados foram próximos aos encontrados no amplo estudo dos municípios, comentado acima. Os três combustíveis apresentaram resultados de eficiência ecológica superiores a 0,46.

Conclui-se assim de modo geral a partir da análise energética, econômica e ambiental, que a implantação de centrais de utilidades para a recuperação energética a partir de resíduos sólidos urbanos nos municípios brasileiros é viável para municípios com pelo menos 100.000 habitantes, sendo possível para municípios com população entre 50.000 a 100.000 habitantes ser viável, a depender fatores como taxa de juros e valor da tarifa de energia elétrica. Contudo, o estabelecimento de consórcios entre municípios que inicialmente não apresentam viabilidade pode ser uma alternativa para que seja viável, uma vez que dessa forma é possível alcançar um volume populacional mínimo, como citado acima.

De modo geral, o modelo de central de utilidades contribui para a adequação das cidades a um perfil sustentável, impactando não somente a infraestrutura urbana, mas também reduzindo impactos ambientais e reduzindo gastos públicos.

Por fim, são sugestões para trabalhos futuros:

- A realização de análise exergoeconômica da Central de Utilidades;
- Analisar a destinação do metanol gerado no processo de transesterificação como mais uma possível fonte de recursos financeiros para alcance da viabilidade econômica;
- Aplicação de diferentes misturas combustíveis para produção de gás de síntese e biogás;
- Realização da análise completa do ciclo de vida para a Central de Utilidades;
- Avaliar a possibilidade do uso do excedente energético ser utilizado para produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, Amith; PARK, Hyojung; CHOI, Okkyoung; SANG, Byoung-In. Anaerobic co-digestion of bioplastics as a sustainable mode of waste management with improved energy production – A review. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 322, p. 124537, 2021. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124537. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852420318113>.
- ABRAHAM, Yewande; GREENWOOD, Lisa; ANDOH, Nana-Yaw; SCHNEIDER, Jennifer. Sustainable Building without Certification: An Exploration of Implications and Trends. **Journal of Sustainability Research**, [S. l.], v. 4, 2022. DOI: 10.20900/jsr20220007. Disponível em: https://sustainability.hapres.com/htmls/JSR_1480_Detail.html.
- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022>.
- ADNAN, Muflih A.; HOSSAIN, Mohammad M.; GOLAM KIBRIA, Md. Converting waste into fuel via integrated thermal and electrochemical routes: An analysis of thermodynamic approach on thermal conversion. **Applied Energy**, [S. l.], v. 311, p. 118574, 2022. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118574. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261922000575>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. RESOLUÇÃO DA DIRETORIA COLEGIADA - RDC Nº 481Brasil, 2021. p. 7. Disponível em: http://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/5887540/RDC_481_2021_COMP.pdf/5ada559b-0f79-4a29-8ff4-ed3dc77804f0.
- AGUIAR, Luiz Guilherme de Andrade; ABREU, Luciana de Paiva Santos; COSTA, Kelly Alonso; MARTINAZZO, Ana Paula; FREITAS, Welington Kiffer De; PERES, Afonso Aurelio de Carvalho. Financial analysis of residual vegetable oil reverse logistics on a Park Road, Brazil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 1–20, 2022. DOI: 10.17765/2176-9168.2022v15n4e8804. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/8804>.
- AHN, Young-Mi; WI, Jun; PARK, Jin-Kyu; HIGUCHI, Sotaro; LEE, Nam-Hoon. Effects of Pre-aeration on the Anaerobic Digestion of Sewage Sludge. **Environmental Engineering Research**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 59–66, 2014. DOI: 10.4491/eer.2014.19.1.059. Disponível em: <http://eeer.org/journal/view.php?doi=10.4491/eer.2014.19.1.059>.
- AL BKOOR ALRAWASHDEH, Khalideh; PUGLIESE, Annarita; SLOPIECKA, Katarzyna; PISTOLESI, Valentina; MASSOLI, Sara; BARTOCCI, Pietro; BIDINI, Gianni; FANTOZZI, Francesco. Codigestion of Untreated and Treated Sewage Sludge with the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. **Fermentation**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 35, 2017. DOI: 10.3390/fermentation3030035. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2311-5637/3/3/35>.
- ALI, Munawar; ZHANG, Junli; RAGA, Roberto; LAVAGNOLO, Maria Cristina;

PIVATO, Alberto; WANG, Xu; ZHANG, Yuanyuan; COSSU, Raffaello; YUE, Dongbei. Effectiveness of aerobic pretreatment of municipal solid waste for accelerating biogas generation during simulated landfilling. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 5, 2018. DOI: 10.1007/s11783-018-1031-1. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11783-018-1031-1>.

ALVES, Bruna. **Generation of municipal waste worldwide as of 2021, by select country**. 2023a. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/916749/global-generation-of-municipal-solid-waste-by-country/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

ALVES, Bruna. **Global waste generation - statistics & facts**. 2023b. Disponível em: <https://www.statista.com/topics/4983/waste-generation-worldwide/#statisticChapter>. Acesso em: 30 jun. 2023.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasília. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf.

ANEEL. REN ANEEL 1.059Brazil, 2023. p. 45. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.pdf>.

ARBITER, Beno; SAMEC, Niko; JOVOVIC, Aleksandar; KOKALJ, Filip. Assessment of a simplified equilibrium model for waste gasification. **Thermal Science**, [S. l.], v. 23, n. Suppl. 5, p. 1473–1486, 2019. DOI: 10.2298/TSCI180726316A. Disponível em: <https://doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0354-98361900316A>.

ARENA, Umberto. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. **Waste Management**, [S. l.], v. 32, n. 4, p. 625–639, 2012. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X11004314>.

ATTIA, Ali M. A.; KULCHITSKIY, A. R.; NOUR, Mohamed; EL-SEESY, Ahmed I.; NADA, Sameh A. The influence of castor biodiesel blending ratio on engine performance including the determined diesel particulate matters composition. **Energy**, [S. l.], v. 239, p. 121951, 2022. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121951. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036054422102199X>.

BAHRI, Shashank; VENEZIA, Anna Maria; UPADHYAYULA, Sreedevi. Utilization of greenhouse gas carbon dioxide for cleaner Fischer-Tropsch diesel production. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 228, p. 1013–1024, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.310. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619314076>.

BARAMPOUTI, E. M.; MAI, S.; MALAMIS, D.; MOUSTAKAS, K.; LOIZIDOU, M. Liquid biofuels from the organic fraction of municipal solid waste: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 110, p. 298–314, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032119302175>.

BHAMBORE, Nandini; SURESH KUMAR, M. Municipal solid waste generation, management scenarios, and leachate treatment using sequencing batch biofilter granular reactor. **Process Safety and Environmental Protection**, [S. l.], v. 167, p. 454–468, 2022. DOI: 10.1016/j.psep.2022.09.027. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582022008011>.

BHATIA, S. C. Biogas. In: **Advanced Renewable Energy Systems**. [s.l.] : Elsevier, 2014. p. 426–472. DOI: 10.1016/B978-1-78242-269-3.50017-6. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781782422693500176>.

BIANCINI, Giovanni; MORADI, Ramin; CIOCCOLANTI, Luca; MARCHETTI, Barbara; MOGLIE, Matteo; DEL ZOTTO, Luca. A general model for air gasification of heterogenous municipal solid waste. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 278, p. 116749, 2023. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.116749. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S019689042300095X>.

BIBIN, Chidambaranathan; SHEEJA, Raghavan; DEVARAJAN, Yuvarajan; S, Madhu; PONNAPPAN, Venkatesan Sorakka; L, Natrayan. Environment impact assessment of agricultural diesel engines utilizing biodiesel derived from phoenix sylvestris oil. **Environmental Research**, [S. l.], v. 224, p. 115432, 2023. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115432. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013935123002244>.

BILOTTA, Patrícia; ROSS, Bárbara Zanicotti Leite. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 275–282, 2016. DOI: 10.1590/s1413-41522016141477. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522016000200275&lng=pt&tlng=pt.

BIOFUELS EDU. **Five Types of Gasifier**. 2013. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=GkHKXz3VaFg>. Acesso em: 9 out. 2023.

BOILERS INFO. **Fluidized Bed Combustion FCB Boiler**. 2018. Disponível em: <https://boilersinfo.com/fluidized-bed-combustion-fbc-boiler/>. Acesso em: 9 out. 2023.

BOLOY, Ronney Arismel Mancebo; SILVEIRA, Jose Luz; TUNA, Celso Eduardo; CORONADO, Christian R.; ANTUNES, Julio Santana. Ecological impacts from syngas burning in internal combustion engine: Technical and economic aspects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 15, n. 9, p. 5194–5201, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2011.04.009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032111001468>.

BORGNACKE, Claus; SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 8ª ed. [s.l.: s.n.].

BOTERO, Wander Gustavo; SANTOS, Ademir Dos; OLIVEIRA, Luciana Camargo De; ROCHA, Julio Cesar. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. **Química Nova**, [S. l.], v. 32, n. 8, p. 2018–2022, 2009. DOI: 10.1590/S0100-40422009000800007. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422009000800007&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos Brasil, 2010. p. 18. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares - Preliminar**. Brasília. Disponível em: https://www.slu.df.gov.br/wp-content/uploads/2017/12/plano_nacional_residuos_solidos.pdf.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares**. Brasília. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf.

BYUN, Youngchul; CHO, Moohyun; HWANG, Soon-Mo; CHUNG, Jaewoo. Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste (MSW). *In: Gasification for Practical Applications*. [s.l.] : InTech, 2012. DOI: 10.5772/48537. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/gasification-for-practical-applications/thermal-plasma-gasification-of-municipal-solid-waste-msw->.

CALZA, Lana F.; LIMA, Cleber B.; NOGUEIRA, Carlos E. C.; SIQUEIRA, Jair A. C.; SANTOS, Reginaldo F. Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. **Engenharia Agrícola**, [S. l.], v. 35, n. 6, p. 990–997, 2015. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p990-997/2015. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162015000600990&lng=pt&tlng=pt.

CAO, Xinyue; FENG, Sijie; SHEN, Xianbao; LI, Xin; YAO, Xiaolong; YAO, Zhiliang. The effects of biodiesel blends on real-world carbonyl emissions from diesel trucks. **Atmospheric Environment**, [S. l.], v. 238, p. 117726, 2020. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117726. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231020304581>.

CÂRDU, Mircea; BAICA, Malvina. Regarding a new variant methodology to estimate globally the ecologic impact of thermopower plants. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 40, n. 14, p. 1569–1575, 1999. DOI: 10.1016/S0196-8904(99)00041-2.

CASTILLO SANTIAGO, York; MARTÍNEZ GONZÁLEZ, Aldemar; VENTURINI, Osvaldo José; YEPES MAYA, Diego Mauricio. Assessment of the energy recovery potential of oil sludge through gasification aiming electricity generation. **Energy**, [S. l.], v. 215, p. 119210, 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119210. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544220323173>.

ÇAYLI, Gökhan; KÜSEFOĞLU, Selim. Increased yields in biodiesel production from used cooking oils by a two step process: Comparison with one step process by using TGA. **Fuel Processing Technology**, [S. l.], v. 89, n. 2, p. 118–122, 2008. DOI: 10.1016/j.fuproc.2007.06.020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037838200700135X>.

CAYUMIL, Romina; KHANNA, Rita; KONYUKHOV, Yuri; BURMISTROV, Igor; KARGIN, Jumat Beisembekovich; MUKHERJEE, Partha Sarathy. An Overview on Solid Waste Generation and Management: Current Status in Chile. **Sustainability**, [S. l.], v. 13, n. 21, p. 11644, 2021. DOI: 10.3390/su132111644. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/21/11644>.

CESTONARO DO AMARAL, André; RADIS STEINMETZ, Ricardo Luis; KUNZ, Airton. Os Biodigestores - Capítulo III. In: **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. [s.l.] : Airton Kunz, Ricardo Luis Radis Steinmetz, André Cestonaro do Amaral (editores Técnicos), 2019. a. p. 41–68. DOI: 10.21452/978-85-93823-01-5.2019.01_3. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/197609/1/final9156.pdf>.

CESTONARO DO AMARAL, André; RADIS STEINMETZ, Ricardo Luis; KUNZ, Airton. O Processo da Biodigestão - Capítulo I. In: **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. [s.l.] : Airton Kunz, Ricardo Luis Radis Steinmetz, André Cestonaro do Amaral (editores Técnicos), 2019. b. p. 13–26. DOI: 10.21452/978-85-93823-01-5.2019.01_1. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/197604/1/final9154.pdf>.

CHAN, Wei Ping; VEKSHA, Andrei; LEI, Junxi; OH, Wen-Da; DOU, Xiaomin; GIANNIS, Apostolos; LISAK, Grzegorz; LIM, Teik-Thye. A hot syngas purification system integrated with downdraft gasification of municipal solid waste. **Applied Energy**, [S. l.], v. 237, p. 227–240, 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.031. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261919300315>.

CHANTHAKETT, Apinya; ARIF, M. T.; KHAN, M. M. K.; OO, Aman M. T. Performance assessment of gasification reactors for sustainable management of municipal solid waste. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 291, p. 112661, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112661. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479721007234>.

CHHITI, Younes; PEYROT, Marine; SALVADOR, Sylvain. Soot formation and oxidation during bio-oil gasification: experiments and modeling. **Journal of Energy Chemistry**, [S. l.], v. 22, n. 5, p. 701–709, 2013. DOI: 10.1016/S2095-4956(13)60093-5. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2095495613600935>.

CHOPRA, S.; JAIN, A. A Review of Fixed Bed Gasification Systems for Biomass. **Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal**, [S. l.], v. 9, n. 5, p. 23, 2007. Disponível em: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/960/954>.

COPA, J. R.; TUNA, C. E.; SILVEIRA, J. L.; BOLOY, R. A. M.; BRITO, P.; SILVA, V.; CARDOSO, J.; EUSÉBIO, D. Techno-Economic Assessment of the Use of Syngas Generated from Biomass to Feed an Internal Combustion Engine. **Energies**, [S. l.], v. 13, n. 12, p. 3097, 2020. DOI: 10.3390/en13123097. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/12/3097>.

CORONADO, Christian R.; CARVALHO, João A.; QUISPE, César A.; SOTOMONTE, Cesar R. Ecological efficiency in glycerol combustion. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 63, n. 1, p. 97–104, 2014. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.11.004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431113007928>.

CORONADO, Christian Rodriguez; DE CARVALHO, João Andrade; YOSHIOKA, Juliana Tiyoko; SILVEIRA, José Luz. Determination of ecological efficiency in internal combustion engines: The use of biodiesel. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 29, n. 10, p. 1887–1892, 2009. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.10.012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431108004316>.

CUMMINS, C. Lyle. Early IC and Automotive Engines. In: 1976, **Anais** [...]. [s.l.: s.n.] DOI: 10.4271/760604. Disponível em: <https://www.sae.org/content/760604/>.

CVENGROŠ, Ján; CVENGROŠOVÁ, Zuzana. Used frying oils and fats and their utilization in the production of methyl esters of higher fatty acids. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 173–181, 2004. DOI: 10.1016/j.biombioe.2003.11.006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096195340300206X>.

DE MELO FREIRE, Rafael Magalhães; SANTOS, Alex Álisson Bandeira; ALMEIDA, Antônio Gabriel Souza. Thermoeconomic evaluation of three proposals for the energy cogeneration unit powered by natural gas, biogas, or syngas. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [S. l.], v. 42, n. 8, p. 440, 2020. DOI: 10.1007/s40430-020-02526-9. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s40430-020-02526-9>.

DEGANUTTI, Roberto; PALHACI, Maria do Carmo Jampaulo Plácido; ROSSI, Marco; TAVARES, Roberto; SANTOS, Claudemilson Dos. Biodigestores Rurais: Modelo indiano, chinês e batelada. In: 4º ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL 2002, **Anais** [...]. [s.l.: s.n.] p. 5. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n4v1/031.pdf>.

DI SERIO, M.; TESSER, R.; DIMICCOLI, M.; CAMMAROTA, F.; NASTASI, M.; SANTACESARIA, E. Synthesis of biodiesel via homogeneous Lewis acid catalyst. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical**, [S. l.], v. 239, n. 1–2, p. 111–115, 2005. DOI: 10.1016/j.molcata.2005.05.041. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1381116905003663>.

DIAS, Joana M.; ALVIM-FERRAZ, Maria C. M.; ALMEIDA, Manuel F. Comparison of the performance of different homogeneous alkali catalysts during transesterification of waste and virgin oils and evaluation of biodiesel quality. **Fuel**, [S. l.], v. 87, n. 17–18, p. 3572–3578, 2008. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.06.014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236108002561>.

DÍAZ, José Antonio; AKHAVAN, Hasti; ROMERO, Amaya; GARCIA-MINGUILLAN, Alba María; ROMERO, Rubí; GIROIR-FENDLER, A.; VALVERDE, Jose Luis. Cobalt and iron supported on carbon nanofibers as catalysts for Fischer–Tropsch synthesis. **Fuel Processing Technology**, [S. l.], v. 128, p. 417–424, 2014. DOI:

10.1016/j.fuproc.2014.08.005. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382014003415>.

DIVYA, D.; GOPINATH, L. R.; MERLIN CHRISTY, P. A review on current aspects and diverse prospects for enhancing biogas production in sustainable means. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 42, p. 690–699, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.055. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114008806>.

DOS REIS, Felipe Bastos; FERNANDES, Palloma Renny Beserra. A REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA ECONOMIA CIRCULAR: ESTUDO DE CASO NO MERCADO DE CALÇADISTA. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 48456–48470, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n5-311. Disponível em:
<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/29772>.

DUAN, Tianhong; LU, Caiping; XIONG, Sheng; FU, Zhenbing; ZHANG, Bo. Evaluation method of the energy conversion efficiency of coal gasification and related applications. **International Journal of Energy Research**, [S. l.], v. 40, n. 2, p. 168–180, 2016. DOI: 10.1002/er.3444. Disponível em:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.3444>.

EL-NAGAR, Raghda Ahmed; GHANEM, Alaa Ali. Syngas Production, Properties, and Its Importance. In: **Sustainable Alternative Syngas Fuel**. [s.l.: s.n.]. p. 20. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/69842>.

EL-ZOHEIRY, Radwan M.; EL-SEESY, Ahmed I.; ATTIA, Ali M. A.; HE, Zhixia; EL-BATSH, Hesham M. Combustion and emission characteristics of Jojoba biodiesel-jet A1 mixtures applying a lean premixed pre-vaporized combustion techniques: An experimental investigation. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 162, p. 2227–2245, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2020.10.031. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148120315974>.

ELIF GULSEN AKBAY, Habibe. Anaerobic mono and co-digestion of agro-industrial waste and municipal sewage sludge: Biogas production potential, kinetic modelling, and digestate characteristics. **Fuel**, [S. l.], v. 355, p. 129468, 2024. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129468. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236123020823>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2023**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>.

ENCINAR, J. M.; GONZÁLEZ, J. F.; RODRÍGUEZ-REINARES, A. Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization. **Fuel Processing Technology**, [S. l.], v. 88, n. 5, p. 513–522, 2007. DOI: 10.1016/j.fuproc.2007.01.002. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382007000045>.

ER-BR. **Grupos Geradores a Gás** Londrina, 2023.
 ESMAILI, Ehsan; MOSTAFAVI, Ehsan; MAHINPEY, Nader. Economic assessment of

integrated coal gasification combined cycle with sorbent CO₂ capture. **Applied Energy**, [S. l.], v. 169, p. 341–352, 2016. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.035. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261916301581>.

FEREIDOOONI, Leila; TAHVILDARI, Kambiz; MEHRPOOYA, Mehdi. Trans-esterification of waste cooking oil with methanol by electrolysis process using KOH. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 116, p. 183–193, 2018. DOI: 10.1016/j.renene.2017.08.067. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096014811730825X>.

FERRAZ DE CAMPOS, Victor Arruda; SILVA, Valter Bruno; CARDOSO, João Sousa; BRITO, Paulo S.; TUNA, Celso Eduardo; SILVEIRA, José Luz. A review of waste management in Brazil and Portugal: Waste-to-energy as pathway for sustainable development. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 178, p. 802–820, 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2021.06.107. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148121009733>.

FONSECA, Fernando Sergio de Toledo; ARAÚJO, Ana Régia Alves De; HENDGES, Tiago Luiz. Análise de Viabilidade Econômica de Biodigestores na Atividade de Suinocultura na Cidade de Balsas - MA: um Estudo de Caso. In: 47º CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL 2009, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre p. 19. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/12517842/analise-de-viabilidade-economica-de-biodigestores-na-sober>.

FREDDO, Alessandra. **CARACTERIZAÇÃO FÍSICO QUÍMICA DE LODO PROVENIENTE DE DUAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO DA REGIÃO OESTE DO PARANÁ**. 2014. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [S. l.], 2014. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12527/2/MD_COEAM_2014_2_01.pdf.

FURUSAWA, Yusuke; TAGUCHI, Haruka; ISMAIL, Siti Norazian; THANGAVEL, Sivasakthivel; MATSUOKA, Koichi; FUSHIMI, Chihiro. Estimation of cold gas efficiency and reactor size of low-temperature gasifier for advanced-integrated coal gasification combined cycle systems. **Fuel Processing Technology**, [S. l.], v. 193, p. 304–316, 2019. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.05.023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037838201930205X>.

GAD, M. S.; HE, Zhixia; EL-SHAFAY, A. S.; EL-SEESY, Ahmed I. Combustion characteristics of a diesel engine running with Mandarin essential oil -diesel mixtures and propanol additive under different exhaust gas recirculation: Experimental investigation and numerical simulation. **Case Studies in Thermal Engineering**, [S. l.], v. 26, p. 101100, 2021. DOI: 10.1016/j.csite.2021.101100. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214157X2100263X>.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL. **Guia de Certificação: Zero Energy**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.gbcbrazil.org.br/wp-content/uploads/2019/06/Guia-Zero-Energy-Completo.pdf>.

GRÜNBERG, Paula Regina Mendes; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias De;

TAVARES, Sergio Fernando. Certificação ambiental de habitações: comparação entre LEED for Homes, Processo Aqua e Selo Casa Azul. **Ambiente & Sociedade**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 195–214, 2014. DOI: 10.1590/S1414-753X2014000200013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2014000200013&lng=pt&tng=pt.

GUABIROBA, Ricardo César da Silva; SILVA, Roberta Meireles Da; CÉSAR, Aldara da Silva; SILVA, Marcelino Aurélio Vieira Da. Value chain analysis of waste cooking oil for biodiesel production: Study case of one oil collection company in Rio de Janeiro - Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 142, p. 3928–3937, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.10.064. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616316742>.

GUO, Xiaolei; DAI, Zhenghua; GONG, Xin; CHEN, Xueli; LIU, Haifeng; WANG, Fuchen; YU, Zunhong. Performance of an entrained-flow gasification technology of pulverized coal in pilot-scale plant. **Fuel Processing Technology**, [S. l.], v. 88, n. 5, p. 451–459, 2007. DOI: 10.1016/j.fuproc.2006.11.010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382006002025>.

GUVEN, Huseyin; AKCA, Mehmet Sadik; IREN, Erol; KELES, Fatih; OZTURK, Izzet; ALTINBAS, Mahmut. Co-digestion performance of organic fraction of municipal solid waste with leachate: Preliminary studies. **Waste Management**, [S. l.], v. 71, p. 775–784, 2018. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.04.039. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X17302957>.

GUZATTO, Rafael; DE MARTINI, Tiago Luis; SAMIOS, Dimitrios. The use of a modified TDSP for biodiesel production from soybean, linseed and waste cooking oil. **Fuel Processing Technology**, [S. l.], v. 92, n. 10, p. 2083–2088, 2011. DOI: 10.1016/j.fuproc.2011.06.013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382011002335>.

HELSEN, L.; BOSMANS, A.; JONES, P. T.; TIELEMANS, Y. Waste-to-Energy through thermochemical processes: matching waste with process. In: PROCEEDINGS OF THE 1ST INTERNATIONAL ACADEMIC SYMPOSIUM ON ENHANCED LANDFILL MINING 2010, Haletra; Houthalen-Helchteren. **Anais** [...]. Haletra; Houthalen-Helchteren. p. 133–180. Disponível em: https://kuleuven.limo.libis.be/discovery/fulldisplay?docid=lirias1745302&context=SearchWebhook&vid=32KUL_KUL:Lirias&search_scope=lirias_profile&tab=LIRIAS&adaptor=SearchWebhook&lang=en.

HILKIAH IGONI, A.; AYOTAMUNO, M. J.; EZE, C. L.; OGAJI, S. O. T.; PROBERT, S. D. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. **Applied Energy**, [S. l.], v. 85, n. 6, p. 430–438, 2008. DOI: 10.1016/j.apenergy.2007.07.013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626190700133X>.

HOANG, Anh Tuan; VARBANOV, Petar Sabev; NIŽETIĆ, Sandro; SIROHI, Ranjna; PANDEY, Ashok; LUQUE, Rafael; NG, Kim Hoong; PHAM, Van Viet. Perspective review on Municipal Solid Waste-to-energy route: Characteristics, management strategy, and role in circular economy. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v.

359, p. 131897, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131897. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652622015074>.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE. Instrução Normativa 13Brasília, 2012. p. 8. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/IN0013-181212.PDF>.
IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas de população enviadas ao TCU**. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2021/POP2021_2023_0710.xls.

INDRAWAN, Natarianto; MOHAMMAD, Sayeed; KUMAR, Ajay; HUHNKE, Raymond L. Modeling low temperature plasma gasification of municipal solid waste. **Environmental Technology & Innovation**, [S. l.], v. 15, p. 100412, 2019. DOI: 10.1016/j.eti.2019.100412. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352186419300331>.

IRFAN, Muhammad; LI, Aimin; ZHANG, Lei; WANG, Mengya; CHEN, Chuanshuai; KHUSHK, Shujaiddin. Production of hydrogen enriched syngas from municipal solid waste gasification with waste marble powder as a catalyst. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 44, n. 16, p. 8051–8061, 2019. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.048. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319919306329>.

ISSARIYAKUL, Titipong; KULKARNI, Mangesh G.; DALAI, Ajay K.; BAKHSHI, Narendra N. Production of biodiesel from waste fryer grease using mixed methanol/ethanol system. **Fuel Processing Technology**, [S. l.], v. 88, n. 5, p. 429–436, 2007. DOI: 10.1016/j.fuproc.2006.04.007. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382007000069>.

JAIN, Siddharth; JAIN, Shivani; WOLF, Ingo Tim; LEE, Jonathan; TONG, Yen Wah. A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 52, p. 142–154, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.091. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115007388>.

JAIN, Siddharth; SHARMA, M. P.; RAJVANSHI, Shalini. Acid base catalyzed transesterification kinetics of waste cooking oil. **Fuel Processing Technology**, [S. l.], v. 92, n. 1, p. 32–38, 2011. DOI: 10.1016/j.fuproc.2010.08.017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382010002821>.

JAMOUISSI, Bassem; ABU-RIZAIZA, Asad; AL-HAIJ, Ali. Sustainable Building Standards, Codes and Certification Systems: The Status Quo and Future Directions in Saudi Arabia. **Sustainability**, [S. l.], v. 14, n. 16, p. 10314, 2022. DOI: 10.3390/su141610314. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/16/10314>.

JEYASEELAN, Thangaraja; EL SAMAD, Tala; RAJKUMAR, Sundararajan; CHATTERJEE, Abhay; AL-ZAILI, Jafar. A techno-economic assessment of waste oil

biodiesel blends for automotive applications in urban areas: Case of India. **Energy**, [S. l.], v. 271, p. 127021, 2023. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544223004152>.

JIANG, Feng; ZHANG, Min; LIU, Bing; XU, Yuebing; LIU, Xiaohao. Insights into the influence of support and potassium or sulfur promoter on iron-based Fischer–Tropsch synthesis: understanding the control of catalytic activity, selectivity to lower olefins, and catalyst deactivation. **Catalysis Science & Technology**, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 1245–1265, 2017. DOI: 10.1039/C7CY00048K. Disponível em: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C7CY00048K>.

KALITA, Pankaj; BORAH, Munu; KATAKI, Rupam; YADAV, Dipti; PATOWARY, Dipam; PATOWARY, Rupam. Biogas and Fuel Cell as Vehicular Fuel in India. In: **Sustainable Biofuels Development in India**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 87–133. DOI: 10.1007/978-3-319-50219-9_5. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-50219-9_5.

KANG, Abbass Jafari; YUAN, Qiuyan. Enhanced Anaerobic Digestion of Organic Waste. In: **Solid Waste Management in Rural Areas**. [s.l.] : InTech, 2017. DOI: 10.5772/intechopen.70148. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/solid-waste-management-in-rural-areas/enhanced-anaerobic-digestion-of-organic-waste>.

KARKI, Renisha; CHUENCHART, Wachiranon; SURENDRA, K. C.; SHRESTHA, Shilva; RASKIN, Lutgarde; SUNG, Shihwu; HASHIMOTO, Andrew; KUMAR KHANAL, Samir. Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 330, p. 125001, 2021. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125001. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852421003400>.

KAZA, Silpa; YAO, Lisa C.; BHADA-TATA, Perinaz; VAN WOERDEN, Frank. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. [s.l.] : Washington, DC: World Bank, 2018. DOI: 10.1596/978-1-4648-1329-0.

KHAN, Afzal Husain; LÓPEZ-MALDONADO, Eduardo Alberto; KHAN, Nadeem A.; VILLARREAL-GÓMEZ, Luis Jesús; MUNSHI, Faris M.; ALSABHAN, Abdullah H.; PERVEEN, Kahkashan. Current solid waste management strategies and energy recovery in developing countries - State of art review. **Chemosphere**, [S. l.], v. 291, p. 133088, 2022. a. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133088. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653521035608>.

KHAN, Shamshad; ANJUM, Raheel; RAZA, Syed Turab; AHMED BAZAI, Nazir; IHTISHAM, Muhammad. Technologies for municipal solid waste management: Current status, challenges, and future perspectives. **Chemosphere**, [S. l.], v. 288, p. 132403, 2022. b. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132403. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653521028757>.

KIRNBAUER, Friedrich; WILK, Veronika; KITZLER, Hannes; KERN, Stefan; HOFBAUER, Hermann. The positive effects of bed material coating on tar reduction in a dual fluidized bed gasifier. **Fuel**, [S. l.], v. 95, p. 553–562, 2012. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.10.066. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236111006843>.

KIYASUDEEN, Katheem; IBRAHIM, Mahamad Hakimi; QUAIK, Shlrene; ISMAIL, Sultan Ahmed. An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes. *In: Prospects of Organic Waste Management and the Significance of Earthworms*. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 23–44. DOI: 10.1007/978-3-319-24708-3_2. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-24708-3_2.

KLAIMI, Rachid; ALNOURI, Sabla Y.; STIJEPOVIĆ, Mirko. Investigation of seasonal variations and multiple fuel options in a novel tri-generation CSP integrated hybrid energy process. **Energy**, [S. l.], v. 261, p. 125338, 2022. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125338. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544222022216>.

KOUZU, Masato; KASUNO, Takekazu; TAJIKA, Masahiko; SUGIMOTO, Yoshikazu; YAMANAKA, Shinya; HIDAKA, Jusuke. Calcium oxide as a solid base catalyst for transesterification of soybean oil and its application to biodiesel production. **Fuel**, [S. l.], v. 87, n. 12, p. 2798–2806, 2008. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.10.019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236107004589>.

KRISHNAN, M. Gowthama; RAJKUMAR, Sundararajan; THANGARAJA, Jeyaseelan; DEVARAJAN, Yuvarajan. Exploring the synergistic potential of higher alcohols and biodiesel in blended and dual fuel combustion modes in diesel engines: A comprehensive review. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, [S. l.], v. 35, p. 101180, 2023. DOI: 10.1016/j.scp.2023.101180. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352554123002140>.

KUMAR, Aman; SINGH, Ekta; MISHRA, Rahul; LO, Shang Lien; KUMAR, Sunil. Global trends in municipal solid waste treatment technologies through the lens of sustainable energy development opportunity. **Energy**, [S. l.], v. 275, p. 127471, 2023. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127471. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544223008654>.

KUMAR, Atul; SAMADDER, S. R. Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review. **Energy**, [S. l.], v. 197, p. 117253, 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117253. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544220303601>.

KUMARI, Madhu; CHANDEL, Munish K. Anaerobic Co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste: Focus on mix ratio optimization and synergistic effects. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 345, p. 118821, 2023. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118821. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479723016092>.

LA VILLETTE, M.; COSTA, M.; MASSAROTTI, N. Modelling approaches to biomass gasification: A review with emphasis on the stoichiometric method. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 74, p. 71–88, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.02.027. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117302290>.

LAM, Man Kee; LEE, Keat Teong; MOHAMED, Abdul Rahman. Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review. **Biotechnology Advances**, [S. l.], v. 28, n. 4, p. 500–518, 2010. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2010.03.002. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734975010000388>.

LANGUER, Mariana Pires; BATISTELLA, Luciane; ALVES, José Luiz Francisco; DA SILVA, Jean Constantino Gomes; DA SILVA FILHO, Valdemar Francisco; DI DOMENICO, Michele; MOREIRA, Regina de Fátima Peralta Muniz; JOSÉ, Humberto Jorge. Insights into pyrolysis characteristics of Brazilian high-ash sewage sludges using thermogravimetric analysis and bench-scale experiments with GC-MS to evaluate their bioenergy potential. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 138, p. 105614, 2020. DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105614. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953420301483>.

LARANCI, Paolo; SILVEIRA, José Luz; LAMAS, Wendell De Queiróz. SOLAR 1.1 software: a case study of a chicken farm illumination project. **Exacta**, [S. l.], v. 10, n. 1, 2012. DOI: 10.5585/exacta.v10n1.2890.

LEBIOCKA, Magdalena; PIOTROWICZ, Adam. Co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste. A comparison between laboratory and technical scales. **Environment Protection Engineering**, [S. l.], v. 38, n. 4, p. 157–162, 2012. DOI: 10.5277/EPE120413.

LEE, Duu-Jong. Gasification of municipal solid waste (MSW) as a cleaner final disposal route: A mini-review. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 344, p. 126217, 2022. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126217. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852421015595>.

LEE, Ki-Teak; FOGLIA, Thomas A.; CHANG, Kyu-Seob. Production of alkyl ester as biodiesel from fractionated lard and restaurant grease. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, [S. l.], v. 79, n. 2, p. 191–195, 2002. DOI: 10.1007/s11746-002-0457-y. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1007/s11746-002-0457-y>.

LERTSATHAPORNUSUK, V.; RUANGYING, P.; PAIRINTRA, R.; KRISNANGKURA, K. Continuous Transesthylation of Vegetable Oils by Microwave Irradiation. In: 111^a CONFERÊNCIA ACADÊMICA DA REDE DE ENERGIA DA TAILÂNDIA 2005, **Anais** [...]. [s.l.: s.n.] p. 4. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/238102891_Continuous_Transethylation_of_Vegetable_Oils_by_Microwave_Irradiation.

LEUNG, Dennis Y. C.; WU, Xuan; LEUNG, M. K. H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. **Applied Energy**, [S. l.], v. 87, n. 4, p. 1083–1095, 2010. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.10.006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261909004346>.

LUCAS, Carlos. **High temperature air/steam gasification of biomass in an updraft fixed bed batch type gasifier**. 2005. [S. l.], 2005. Disponível em: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:7957/FULLTEXT01.pdf>.

LUO, Tao; KHOSHNEVISAN, Benyamin; PAN, Junting; GE, Yihong; MEI, Zili; XUE, Jian; FU, Yanran; LIU, Hongbin. How exothermic characteristics of rice straw during anaerobic digestion affects net energy production. **Energy**, [S. l.], v. 212, p. 118772, 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118772. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036054422031879X>.

LUO, Xiang; WU, Tao; SHI, Kaiqi; SONG, Mingxuan; RAO, Yusen. Biomass Gasification: An Overview of Technological Barriers and Socio-Environmental Impact. In: **Gasification for Low-grade Feedstock**. [s.l.] : InTech, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.74191. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/gasification-for-low-grade-feedstock/biomass-gasification-an-overview-of-technological-barriers-and-socio-environmental-impact>.

LUZ, Fábio Codignole; ROCHA, Mateus Henrique; LORA, Electo Eduardo Silva; VENTURINI, Osvaldo José; ANDRADE, Rubenildo Vieira; LEME, Marcio Montagnana Vicente; DEL OLMO, Oscar Almazán. Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 103, p. 321–337, 2015. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.06.074. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890415006226>.

LUZ, Gelson. **Densidade de Resíduos Sólidos**. 2022. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2019/04/densidade-de-residuos-solidos.html>. Acesso em: 4 out. 2023.

LYTRAS, George; LYTRAS, Chris; MATHIOUDAKIS, Dimitrios; PAPADOPOULOU, Konstantina; LYBERATOS, Gerasimos. Food Waste Valorization Based on Anaerobic Digestion. **Waste and Biomass Valorization**, [S. l.], v. 12, n. 4, p. 1677–1697, 2021. DOI: 10.1007/s12649-020-01108-z. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s12649-020-01108-z>.

MAALOUF, Amani; MAVROPOULOS, Antonis; EL-FADEL, Mutasem. Global municipal solid waste infrastructure: Delivery and forecast of uncontrolled disposal. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [S. l.], v. 38, n. 9, p. 1028–1036, 2020. DOI: 10.1177/0734242X20935170. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X20935170>.

MACHADO, L. DO P.; CESCION, J. A.; LAZZAROTTO, E.; DE SOUZA, A. L. V. Análise da Viabilidade do Pagamento aos Pequenos Produtores pelos Dejetos Suínos para Geração de Energia - Biogás. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS 2020, **Anais [...]**. [s.l.: s.n.] p. 14. Disponível em: <https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/4738>.

MAHMUDUL, H. M.; HAGOS, F. Y.; MAMAT, R.; ADAM, A. Abdul; ISHAK, W. F. W.; ALENEZI, R. Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 72, p. 497–509, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.001. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117300047>.

MALIK, Prashant; AWASTHI, Mamta. Techno-economic and Environmental Evaluation of Producer Gas-Based IC Engine in a Hybrid Energy System. *In*: [s.l.: s.n.]. p. 59–93. DOI: 10.1007/978-981-16-1513-9_4. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/978-981-16-1513-9_4.

MALUF FILHO, Durval; COELHO, Suani Teixeira; PERECIN, Danilo. Opportunities and Challenges of Gasification of Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. **Energies**, [S. l.], v. 15, n. 8, p. 2735, 2022. DOI: 10.3390/en15082735. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/8/2735>.

MANAF, Intan Shafinaz Abd; EMBONG, Nurul Hajar; KHAZAAI, Siti Norhafiza Mohd; RAHIM, Mohd Hasbi Ab.; YUSOFF, Mashitah M.; LEE, Keat Teong; MANIAM, Gaanty Pragas. A review for key challenges of the development of biodiesel industry. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 185, p. 508–517, 2019. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.02.019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890419302018>.

MANDOLESI DE ARAÚJO, Carlos Daniel; DE ANDRADE, Claudia Cristina; DE SOUZA E SILVA, Erika; DUPAS, Francisco Antonio. Biodiesel production from used cooking oil: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 27, p. 445–452, 2013. DOI: 10.1016/j.rser.2013.06.014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113003912>.

MARCHETTI, J. M.; MIGUEL, V. U.; ERRAZU, A. F. Possible methods for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 11, n. 6, p. 1300–1311, 2007. DOI: 10.1016/j.rser.2005.08.006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032105001073>.

MATERAZZI, Massimiliano; LETTIERI, Paola; MAZZEI, Luca; TAYLOR, Richard; CHAPMAN, Chris. Thermodynamic modelling and evaluation of a two-stage thermal process for waste gasification. **Fuel**, [S. l.], v. 108, p. 356–369, 2013. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.02.037. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236113001397>.

MAZZONI, Luca; JANAJREH, Isam. Plasma gasification of municipal solid waste with variable content of plastic solid waste for enhanced energy recovery. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 42, n. 30, p. 19446–19457, 2017. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.069. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319917323406>.

MEDINA JIMENEZ, Ana Carolina; BERECHÉ, Reynaldo Palacios-; NEBRA, Silvia. Three municipal solid waste gasification technologies analysis for electrical energy generation in Brazil. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [S. l.], v. 37, n. 6, p. 631–642, 2019. DOI: 10.1177/0734242X19841126. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X19841126>.

MENDOZA, Ronaldo Rosales; DE LIMA, Aline Meiguins; DA SILVA PIMENTEL, Marcia Aparecida; PONTES, Altem Nascimento; ROCHA, Edson. World development and generation of waste. **Environmental Science and Pollution**

Research, [S. l.], v. 30, n. 6, p. 14792–14804, 2022. DOI: 10.1007/s11356-022-23106-5. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11356-022-23106-5>.

MERCY NISHA PAULINE, J.; SIVARAMAKRISHNAN, Ramachandran; PUGAZHENDHI, Arivalagan; ANBARASAN, T.; ACHARY, Anant. Transesterification kinetics of waste cooking oil and its diesel engine performance. **Fuel**, [S. l.], v. 285, p. 119108, 2021. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119108. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236120321049>.

MERLOTO, Murilo Cesar; MOURA, Carlos Henrique Silva; PEREIRA, Vanessa Rodrigues; FIORE, Fabiana Alves. Avaliação da qualidade dos planos de resíduos sólidos: estudo de caso na região das Bacias PCJ. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 61, p. 242–259, 2023. DOI: 10.5380/dma.v61i0.80354. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/80354/49168>.

MISRA, Atulya; TAJUDEEN, Shaafi; VENKATARAMANI, Gayathri; AYYASAMY, Elayaperumal; RAMALINGAM, Velraj. Role of biodiesel with nanoadditives in port owned trucks and other vehicles for emission reduction. **Thermal Science**, [S. l.], v. 21, n. 1 Part B, p. 605–614, 2017. DOI: 10.2298/TSCI160613295M. Disponível em: <https://doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0354-98361600295M>.

MONIKA; BANGA, Sangita; PATHAK, Vinayak V. Biodiesel production from waste cooking oil: A comprehensive review on the application of heterogenous catalysts. **Energy Nexus**, [S. l.], v. 10, p. 100209, 2023. DOI: 10.1016/j.nexus.2023.100209.

MOTA-PANIZIO, Roberta; HERMOSO-ORZÁEZ, Manuel Jesús; CARMO-CALADO, Luís; CAMPOS, Victor Arruda Ferraz De; SILVEIRA, José Luz; GONÇALVES, Maria Margarida; BRITO, Paulo. Energy Recovery via Thermal Gasification from Waste Insulation Electrical Cables (WIEC). **Applied Sciences**, [S. l.], v. 10, n. 22, p. 8253, 2020. DOI: 10.3390/app10228253. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/22/8253>.

MOURA, Carlos Henrique Silva; SILVEIRA, José Luz; LAMAS, Wendell de Queiróz. 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**, [S. l.], v. 45, n. 56, p. 31585–31598, 2020. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.198. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319920332250>.

MUNIR, M. T.; MARDON, I.; AL-ZUHAIR, S.; SHAWABKEH, A.; SAQIB, N. U. Plasma gasification of municipal solid waste for waste-to-value processing. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 116, p. 109461, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109461. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032119306690>.

MUNIR, M. T.; MOHADDESPOUR, Ahmad; NASR, A. T.; CARTER, Susan. Municipal solid waste-to-energy processing for a circular economy in New Zealand. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 145, p. 111080, 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111080. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032121003683>.

NADALETI, Willian César; PRZYBYLA, Grzegorz; BELLI FILHO, Paulo; DE SOUZA, Samuel Nelson Melegari; QUADRO, Maurizio; ANDREAZZA, Robson. Methane–hydrogen fuel blends for SI engines in Brazilian public transport: Potential supply and environmental issues. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 42, n. 17, p. 12615–12628, 2017. a. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.124. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319917310698>.

NADALETI, Willian César; PRZYBYLA, Grzegorz; BELLI FILHO, Paulo; SOUZA, Samuel. Methane-hydrogen fuel blends for SI engines in Brazilian public transport: Efficiency and pollutant emissions. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 42, n. 49, p. 29585–29596, 2017. b. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.10.068. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319917340454>.

NESHAT, Soheil A.; MOHAMMADI, Maedeh; NAJAFPOUR, Ghasem D.; LAHIJANI, Pooya. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 79, p. 308–322, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.137. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117307694>.

NG, Kim Hoong; YUAN, Lai Sin; CHENG, Chin Kui; CHEN, Kaijuan; FANG, Chao. TiO₂ and ZnO photocatalytic treatment of palm oil mill effluent (POME) and feasibility of renewable energy generation: A short review. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 233, p. 209–225, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.044. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619319973>.

NILSSON, Susanna; GÓMEZ-BAREA, Alberto; FUENTES-CANO, Diego; CAMPOY, Manuel. Gasification kinetics of char from olive tree pruning in fluidized bed. **Fuel**, [S. l.], v. 125, p. 192–199, 2014. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.02.006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236114001331>.

NITROTEC. **Tabela de Gases**, 2020. Disponível em: <https://nitrotec.com.br/global/wp-content/uploads/2020/10/11-002535-Ebook-tabela-de-gases-1920-x-1080-2.pdf>.

NIU, Miaomiao; HUANG, Yaji; JIN, Baosheng; WANG, Xinye. Simulation of Syngas Production from Municipal Solid Waste Gasification in a Bubbling Fluidized Bed Using Aspen Plus. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [S. l.], v. 52, n. 42, p. 14768–14775, 2013. DOI: 10.1021/ie400026b. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie400026b>.

NUAMAH, A.; MALMGREN, A.; RILEY, G.; LESTER, E. Biomass Co-Firing. In: **Comprehensive Renewable Energy**. [s.l.] : Elsevier, 2012. p. 55–73. DOI: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00506-0. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080878720005060>.

OTENIO, Marcelo Henrique. Biodigestores como Oportunidade no Manejo de Dejetos. In: III WORKSHOP DE BIOENERGIA 2016, Viçosa. **Anais [...]**. Viçosa p. 58. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/marcelootenio/control-dos-parametros-para-producao-de-biogaz-otenio-26-08-2016ufv>.

PALACIO, José Carlos Escobar; SANTOS, José Joaquim Conceição Soares; RENÓ, Maria Luiza Grillo; FURTADO JÚNIOR, Juarez Corrêa; CARVALHO, Monica; REYES, Arnaldo Martín Martínez; OROZCO, Dimas José Rúa. Municipal Solid Waste Management and Energy Recovery. *In: Energy Conversion - Current Technologies and Future Trends*. [s.l.] : IntechOpen, 2019. DOI: 10.5772/intechopen.79235. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/energy-conversion-current-technologies-and-future-trends/municipal-solid-waste-management-and-energy-recovery>.

PAULINO, Regina Franciélle Silva. **Uso do Biogás para Produção de Biohidrogênio: Eletrólise versus reforma a vapor**. 2017. Universidade Estadual Paulista, [S. l.], 2017. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/150655/paulino_rfs_me_guara.pdf?sequence=3.

PERSADA, C.; SITORUS, S. R. P.; MARIMIN; DJAKAPERMANA, R. D. Policy Model of Sustainable Infrastructure Development (Case Study : Bandarlampung City, Indonesia). **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S. l.], v. 124, p. 012008, 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/124/1/012008. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/124/1/012008>.

PINTO OLIVEIRA, Dayane Cynthia; CHIANCA PIMENTEL FILHO, Max; ALENCAR FREITAS, Antonio Alisson. Energy Efficiency Analysis in Buildings of a University Campus Using the PROCEL RTQ-C. *In: 2021 14TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON) 2021, Anais [...]*. : IEEE, 2021. p. 710–715. DOI: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529606. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9529606/>.

PREFEITURA MUNICIPAL DA ESTÂNCIA TURÍSTICA DE GUARATINGUETÁ. **Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico**. Guaratinguetá. Disponível em: <https://guaratingueta.sp.gov.br/wp-content/uploads/2017/01/Revisão-PMISB-Guaratinguetá-2016.pdf>.

PREFEITURA MUNICIPAL DA ESTÂNCIA TURÍSTICA DE GUARATINGUETÁ. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Guaratinguetá. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/14yJ_uTpr6CCQJalTCOyfVrHV7OYwR7cx/view.

PUIG-ARNAVAT, Maria; BRUNO, Joan Carles; CORONAS, Alberto. Review and analysis of biomass gasification models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 14, n. 9, p. 2841–2851, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.030. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032110002108>.

QINGDAO KEXIN NEW ENERGY TECHNOLOGY. **Biomass Gasifier**. 2023. Disponível em: https://www.alibaba.com/product-detail/biomass-gasifier-syngas-burner-pyrolysis-biomass_1600818513768.html. Acesso em: 20 out. 2023.

REBEHY, Perla Calil Pongeluppe Wadhy; SALGADO JUNIOR, Alexandre Pereira; OMETTO, Aldo Roberto; ESPINOZA, Diego de Freitas; ROSSI, Efigenia; NOVI,

Juliana Chiaretti. Municipal solid waste management (MSWM) in Brazil: Drivers and best practices towards to circular economy based on European Union and BSI.

Journal of Cleaner Production, [S. l.], v. 401, p. 136591, 2023. DOI:

10.1016/j.jclepro.2023.136591. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652623007497>.

REFAAT, A. A.; ATTIA, N. K.; SIBAK, H. A.; EL SHELTAWEY, S. T.; ELDIWANI, G. I. Production optimization and quality assessment of biodiesel from waste vegetable oil.

International Journal of Environmental Science & Technology, [S. l.], v. 5, n. 1,

p. 75–82, 2008. DOI: 10.1007/BF03325999. Disponível em:

<http://link.springer.com/10.1007/BF03325999>.

RUBIO-JIMENEZ, Carlos Alberto; RAMIREZ-OLMOS, Cristina; LOPEZ-PEREZ, Alma Cecilia; PEREZ-PANTOJA, Ana Lucia; ZANOR, Gabriela Ana; SEGOVIANO-GARFIAS, Jose de Jesus Nezahualcoyotl. The controlled incineration process as an alternative to handle MSW and generate electric energy in the state of Guanajuato, Mexico.

Energy and Climate Change, [S. l.], v. 4, p. 100102, 2023. DOI:

10.1016/j.egycc.2023.100102. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666278723000090>.

RYUE, John; LIN, Long; KAKAR, Farokh Laqa; ELBESHBISHY, Elsayed; AL-MAMUN, Abdullah; DHAR, Bipro Ranjan. A critical review of conventional and emerging methods for improving process stability in thermophilic anaerobic digestion.

Energy for Sustainable Development, [S. l.], v. 54, p. 72–84, 2020. DOI:

10.1016/j.esd.2019.11.001. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0973082619312682>.

SANSANIWAL, S. K.; PAL, K.; ROSEN, M. A.; TYAGI, S. K. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 72, p. 363–384, 2017. DOI:

10.1016/j.rser.2017.01.038. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117300394>.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE. **Anuário de Energéticos por Municípios**. [s.l.: s.n.]. Disponível em:

<https://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalecv2/intranet/Eletricidade/index.html>

.

SEO, Yong-Chil; ALAM, Md Tanvir; YANG, Won-Seok. Gasification of Municipal Solid Waste. In: **Gasification for Low-grade Feedstock**. [s.l.] : InTech, 2018. DOI:

10.5772/intechopen.73685. Disponível em:

<http://www.intechopen.com/books/gasification-for-low-grade-feedstock/gasification-of-municipal-solid-waste>.

SHETH, Anal; SARKAR, Debasis; MUKHOPADHYAY, Indrajit. Social benefit cost and life cycle cost analysis of sustainable biodiesel bus transport in India.

International Journal of Sustainable Engineering, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 123–136,

2021. DOI: 10.1080/19397038.2020.1774818. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19397038.2020.1774818>.

SILVEIRA, José Luz; LAMAS, Wendell de Queiróz; DA SILVA, Márcio Evaristo; BRAGA, Lúcia Bollini; COSTA, Adriana Aparecida dos Santos; MARTINS, Cristiane Aparecida. Uso de etanol para a produção de hidrogênio e acionamento de motor aeronáutico flex. *In: Bioenergia: desenvolvimento, pesquisa e inovação*. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2012. p. 547–593.

SINGH, Digambar; SHARMA, Dilip; SONI, S. L.; INDA, Chandrapal Singh; SHARMA, Sumit; SHARMA, Pushpendra Kumar; JHALANI, Amit. A comprehensive review of biodiesel production from waste cooking oil and its use as fuel in compression ignition engines: 3rd generation cleaner feedstock. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 307, p. 127299, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127299. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652621015183>.

SINIR - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS. **Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos 2020**. 2021. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 20 jul. 2023.

SUN, Shaoni; SUN, Shaolong; CAO, Xuefei; SUN, Runcang. The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 199, p. 49–58, 2016. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.08.061. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852415011670>.

SURYAWANSHI, S. J.; SHEWALE, V. C.; THAKARE, R. S.; YARASU, R. B. Parametric study of different biomass feedstocks used for gasification process of gasifier—a literature review. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [S. l.], v. 13, n. 9, p. 7689–7700, 2023. DOI: 10.1007/s13399-021-01805-2. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s13399-021-01805-2>.

SYAFIUDDIN, Achmad; CHONG, Jia Hao; YUNIARTO, Adhi; HADIBARATA, Tony. The current scenario and challenges of biodiesel production in Asian countries: A review. **Bioresource Technology Reports**, [S. l.], v. 12, p. 100608, 2020. DOI: 10.1016/j.biteb.2020.100608. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2589014X20302309>.

TAVARES, Raquel; RAMOS, Ana; ROUBOA, Abel. A theoretical study on municipal solid waste plasma gasification. **Waste Management**, [S. l.], v. 90, p. 37–45, 2019. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.051. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X19301837>.

TEIXEIRA, Sandra; MONTEIRO, Eliseu; SILVA, Valter; ROUBOA, Abel. Prospective application of municipal solid wastes for energy production in Portugal. **Energy Policy**, [S. l.], v. 71, p. 159–168, 2014. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.04.002. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421514002109>.

THE WORLD BANK. **Total Urban Population**. 2021. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL>.

TIMMER, Kevin J.; BROWN, Robert C. Transformation of char carbon during bubbling fluidized bed gasification of biomass. **Fuel**, [S. l.], v. 242, p. 837–845, 2019. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.01.039. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236119300390>.

TISEO, Ian. **Generation of municipal solid waste worldwide in 2016, by region**. 2023. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/916592/global-generation-of-municipal-solid-waste-by-region/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

TOMASEVIC, A. V.; SILER-MARINKOVIC, S. S. Methanolysis of used frying oil. **Fuel Processing Technology**, [S. l.], v. 81, n. 1, p. 1–6, 2003. DOI: 10.1016/S0378-3820(02)00096-6. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382002000966>.

TURKAY, Selma; CIVELEKOGLU, Halidun. Deacidification of sulfur olive oil. I. Single-stage liquid-liquid extraction of miscella with ethyl alcohol. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, [S. l.], v. 68, n. 2, p. 83–86, 1991. DOI: 10.1007/BF02662322. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1007/BF02662322>.

TYAGI, Vinay Kumar; FDEZ-GÜELFO, L. A.; ZHOU, Yan; ÁLVAREZ-GALLEGU, C. J.; GARCIA, L. I. Romero; NG, Wun Jern. Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 93, p. 380–399, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.05.051. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118303976>.

UDDIN, Waqar et al. Biogas potential for electric power generation in Pakistan: A survey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 54, p. 25–33, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.083. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115010539>.

ULAKPA, Wisdom C.; ULAKPA, Ruth O. E.; EYANKWARE, Emmanuel O.; EGWUNYENGA, Michael C. Statistical optimization of biodiesel synthesis from waste cooking oil using NaOH/ bentonite impregnated catalyst. **Cleaner Waste Systems**, [S. l.], v. 3, p. 100049, 2022. DOI: 10.1016/j.clwas.2022.100049. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2772912522000495>.

VAISH, Barkha; SHARMA, Bhavisha; SRIVASTAVA, Vaibhav; SINGH, Pooja; IBRAHIM, M. Hakimi; SINGH, Rajeev Pratap. Energy recovery potential and environmental impact of gasification for municipal solid waste. **Biofuels**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 87–100, 2019. DOI: 10.1080/17597269.2017.1368061. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17597269.2017.1368061>.

VAISHNAVI SREE, J.; AKHIL CHOWDARY, Boddu; SANTOSH KUMAR, Kottu; ANBAZHAGAN, Mohana Preethi; SUBRAMANIAN, Sindhu. Optimization of the biodiesel production from waste cooking oil using homogeneous catalyst and heterogeneous catalysts. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 46, p. 4900–4908, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.332. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785320379438>.

VAN GERPEN, J.; SHANKS, B.; PRUSZKO, R.; CLEMENTS, D.; KNOTHE, G. **Biodiesel Production Technology: August 2002--January 2004**. Golden, CO (United States). DOI: 10.2172/15008801. Disponível em:

<http://www.osti.gov/servlets/purl/15008801/>.

WEI, Juntao; GUO, Qinghua; HE, Qing; DING, Lu; YOSHIKAWA, Kunio; YU, Guangsu. Co-gasification of bituminous coal and hydrochar derived from municipal solid waste: Reactivity and synergy. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 239, p. 482–489, 2017. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852417306533>.

WIKIPÉDIA. **Guaratinguetá**. 2023. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Guaratinguetá>. Acesso em: 31 out. 2023.
WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Brundtland Report**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>.

WORLD GREEN BUILDING COUNCIL. **Sustainable Building Certifications**. 2023. Disponível em: <https://worldgbc.org/sustainable-building-certifications/>. Acesso em: 11 out. 2023.

XAVIER, Helene Beatriz. **Aspectos Termodinâmicos, Ecológicos e Econômicos de Sistemas de Cogeração com Motores de Combustão Interna Operando com Gás Natural, Biogás e Gás de Síntese**. 2016. Universidade Estadual Paulista, [S. l.], 2016.

YAASHIKAA, P. R.; KUMAR, P. Senthil; SARAVANAN, A.; VARJANI, Sunita; RAMAMURTHY, Racchana. Bioconversion of municipal solid waste into bio-based products: A review on valorisation and sustainable approach for circular bioeconomy. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 748, p. 141312, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141312. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969720348415>.

YONG; BASHIR; NG; SETHUPATHI; LIM; SHOW. Sustainable Waste-to-Energy Development in Malaysia: Appraisal of Environmental, Financial, and Public Issues Related with Energy Recovery from Municipal Solid Waste. **Processes**, [S. l.], v. 7, n. 10, p. 676, 2019. DOI: 10.3390/pr7100676. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/10/676>.

YU, H.; CHEN, G.; XU, Y.; CHEN, D. Experimental study on the gasification characteristics of biomass with CO₂/air in an entrained-flow gasifier. **BioResources**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 6085–6096, 2016. DOI: 10.15376/biores.11.3.6085-6096. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/experimental-study-on-the-gasification-characteristics-of-biomass-with-co2air-in-an-entrained-flow-gasifier/>.

ZAMRI, M. F. M. A.; HASMADY, Saiful; AKHIAR, Afifi; IDERIS, Fazril; SHAMSUDDIN, A. H.; MOFIJUR, M.; FATTAH, I. M. Rizwanul; MAHLIA, T. M. I. A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 137, p. 110637, 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110637. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032120309217>.

ZUCARO, Amalia; MASELLI, Gabriella; ULGIATI, Sergio. Insights in Urban Resource Management: A Comprehensive Understanding of Unexplored Patterns. **Frontiers in Sustainable Cities**, [S. l.], v. 3, 2022. DOI: 10.3389/frsc.2021.807735. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frsc.2021.807735/full>.

**ANEXO A – CATÁLOGO DA ERBR DOS GRUPOS GERADORES A GÁS:
BIOGÁS, GÁS NATURAL, SYNGAS, GLP**



GRUPOS GERADORES A GÁS

BIOGÁS - GÁS NATURAL - SYNGAS - GLP



A ER-BR é uma empresa 100% nacional, sediada em Londrina - PR, que atua desde 1999 no desenvolvimento de soluções para produção de energia e biocombustíveis, utilizando-se preferencialmente fontes renováveis.

Foi a primeira empresa a fabricar, no Brasil, grupos motogeradores de energia elétrica para utilizarem 100% de gás como combustível (Biogás, Gás Natural, Gás de Síntese e GLP) e em 2010

implantou a primeira fábrica brasileira para industrialização de motores estacionários a gás.

Com profissionais altamente capacitados a empresa oferece ao mercado todo suporte necessário para o desenvolvimento, implantação e manutenção de projetos de acordo com as necessidades específicas de cada Cliente, garantindo assim, a redução de custos com a geração de renda de maneira sustentável.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

- ▶ A potência (kW/h) a ser gerada depende diretamente da disponibilidade e a qualidade do gás (Biogás, Syngas, Gás Natural ou GLP), ou seja, o volume produzido (Nm³/h) e o poder calorífico do gás (Kcal/Nm³);
- ▶ Os grupos geradores foram projetados para funcionarem em regime CONTÍNUO com carga variável ou geração distribuída (GD);
- ▶ Funcionam conectados em paralelo para atender a qualquer necessidade de carga de maneira independente, ou seja, a parada por qualquer motivo de um ou mais equipamentos não impede a continuidade do funcionamento dos outros e somente serão acionados os geradores necessários para atender a demanda de energia;
- ▶ Tecnologia 100% nacional. Os custos de manutenção são baixos, pois todos os componentes são nacionais e estão disponíveis em todo território nacional;
- ▶ Todos os motores ER-BR são testados através da utilização de um dinamômetro para potências até 1000 hp;
- ▶ Todos os grupos geradores montados são testados através da utilização de um banco simulador de cargas;
- ▶ Para concentrações de H₂S (gás sulfídrico) acima de 100 ppm a ER-BR fornece o sistema de filtragem;
- ▶ Garantia de 1 ano ou 2000 horas (o que ocorrer primeiro), desde que atendidas comprovadamente todas as exigências com relação às manutenções preventivas e a qualidade do gás utilizado.

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS						
Grupo Gerador	Emergência		Principal		Contínuo 24h (GD)	
	kVA	kW	kVA	kW	kVA	kW
GMWM30	30	24	27	22	25	20
GMWM50	50	40	45	36	40	32
GMWM80	80	64	72	58	68	55
GMWM120	120	96	108	87	96	75
GSCA250	250	200	225	180	200	160
GSCA330	330	264	300	240	264	200
GSCA420	420	336	380	300	325	250

Tensão: (127V/220V) (220V/380V) (257V/480V) - 60 Hz
 Alternador - WEG: Normas NBR / IEC / NEMA / ISO / CSA - Proteção Ip-21 / 23 - Classe F / H
 • Estas potências permitem uma operação segura (definidas com a utilização de dinamômetro e banco de cargas).
 • Emergência: Falta momentânea de energia na rede elétrica.
 • Principal (horário de Ponta): 3 horas contínuas de funcionamento
 • Contínuo: 24 horas/ 7 dias por semana com carga variável ou em geração distribuída (GD)

CARACTERÍSTICAS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL - REGIME CONTÍNUO					
Grupo Gerador	Potência (Pico)	ESTIMATIVA de consumo de GÁS com 100% de carga (Nm ³)			
		Biogás 65% CH ₄	Biogás 75% CH ₄	GN / Biometano	Syngas > 4500 Kcal
GMWM30	20 kW/h	14 Nm ³ /h	12 Nm ³ /h	9 Nm ³ /h	23 Nm ³ /h
GMWM50	32 kW/h	20 Nm ³ /h	17 Nm ³ /h	13 Nm ³ /h	33 Nm ³ /h
GMWM80	55 kW/h	34 Nm ³ /h	29 Nm ³ /h	22 Nm ³ /h	55 Nm ³ /h
GMWM120	77 kW/h	47 Nm ³ /h	40 Nm ³ /h	30 Nm ³ /h	75 Nm ³ /h
GSCA250	160 kW/h	75 Nm ³ /h	63 Nm ³ /h	48 Nm ³ /h	121 Nm ³ /h
GSCA330	211 kW/h	97 Nm ³ /h	82 Nm ³ /h	62 Nm ³ /h	156 Nm ³ /h
GSCA420	260 kW/h	118 Nm ³ /h	100 Nm ³ /h	76 Nm ³ /h	191 Nm ³ /h

• Biogás 55 % CH₄ (metano): concentração mínima para não ocorrer perda de potência do motor
 • Biogás com 65 % de CH₄ (metano) possui um Poder calorífico inferior (PCI Kcal/Nm³) = 5.500 Kcal/Nm³
 • Biogás com 75 % de CH₄ (metano) possui um Poder calorífico inferior (PCI Kcal/Nm³) = 6.500 Kcal/Nm³
 • Syngas (gás de síntese): Além do poder calorífico o consumo depende diretamente da composição do Syngas
 • Nm³ (normal metro cúbico): CNTP (Condições Normais de Temperatura e Pressão) 25 °C / 1 ATM

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS						
Grupo Gerador	MOTOR ER-BR		DIMENSÕES		Energia Térmica	
	Long Block	Modelo	A X L X C (mm)	PESO (kg)	Gás de Escape	Temp. °C
GMWM30	MWM	D229 3C/6V	1350 X 850 X 1850	570	0,17 kg/seg	526 °C
GMWM50	MWM	D229 4C/8V	1400 X 880 X 2060	640	0,23 kg/seg	589 °C
GMWM80	MWM	4.12 T 4C/8V	1500 X 860 X 2165	950	0,26 kg/seg	652 °C
GMWM120	MWM	6.12 T 6C/12V	1500 X 960 X 2550	1150	0,39 kg/seg	654 °C
GSCA250	SCANIA	OC13 6C/24V	2900 X 1150 X 3200	2450	0,59 kg/seg	653 °C
GSCA330	SCANIA	OC13 6C/24V	2900 X 1150 X 3200	2450	0,64 kg/seg	688 °C
GSCA420	SCANIA	OC13 6C/24V	2900 X 1150 X 3200	2700	0,69 kg/seg	670 °C

• Peso: total com óleo lubrificante sem água no radiador

Dados técnicos sujeitos a alteração sem prévio aviso.



ERBR - Energias Renováveis Ltda.
 Rua João Guilherme, 589 - Parque Industrial Kiugo Takata - CEP 86042-290 - Londrina - PR
 TEL: (43) 3377-0100 - FAX: (43) 3377-0110 - www.erbr.com.br



ANEXO B – CATÁLOGO DA KEXIN DE GASEIFICADORES



青 岛 科 信 新 能 源 技 术 有 限 公 司
Qingdao Kexin New Energy Technology Co., Ltd

Telephone: 008613210769079, E-mail: wang@kexinqd.com

Introduction of Biomass Syngas Power Generation System

The biomass syngas power generation system mainly includes a downdraft type, a fluidized bed type biomass gasifier and a syngas generator set.

Our technology that converts all kinds of low calorific value solid biomass energy resources (such as agricultural and forestry waste, crop straw, domestic organic waste, edible fungi residue, livestock manure, and all combustible substances) into Biomass gas, Biomass carbon, Biomass oil, Wood vinegar, through gasification.

This kind of application is very extensive. It includes various applications in industry and life, such as drying, boiler, kitchen, etc. in most of the application processes, the technology of using biomass synthesis gas for power generation is the most advanced among various methods.

KX series biomass gasifier is a biomass gasifier with downward suction technology and fluidized bed technology designed for biomass synthesis gas power generation. It adopts modular design, simple installation and convenient transportation. The use of dry purification technology avoids secondary water pollution in the natural environment. The raw materials are highly adaptable, and only the size of the biomass raw materials is less than 30 mm, and the moisture content is less than 20%. The control system adopts PLC intelligent control system, which fully realizes continuous automatic operation for 24 hours in a long time.

Biomass gasifier consists of furnace system, dedusting system, cooling system, tar purification system, tar separation system, roots blower, electrical control system, etc. The syngas generator set is mainly composed of gas engine, three-phase AC synchronous engine, control cabinet, common chassis and air source connection part. Auxiliary equipment include shredder, dryer, conveyor, etc

Syngas generator set is a generator set designed for the characteristics of biomass syngas. The body of the gas engine matched by this type of generator set is based on the diesel engine and is based on the working characteristics of the gas engine. Optimize, strengthen, and simplify the design separately. While inheriting the excellent mechanical strength of its diesel engine, it optimizes the working efficiency of the gas engine by optimizing the fuel pressure regulation, mixing, ignition and combustion methods. At the same time, the heat load of the engine is minimized.

The control module of generator set adopts the control technology of generator set with microprocessor as the core, which has many functions such as automatic data recording, automatic operation, automatic control, automatic protection, and has good reliability and stability performance. The operation parameters of the unit are displayed by large screen liquid crystal, and the displayed data is large and accurate.

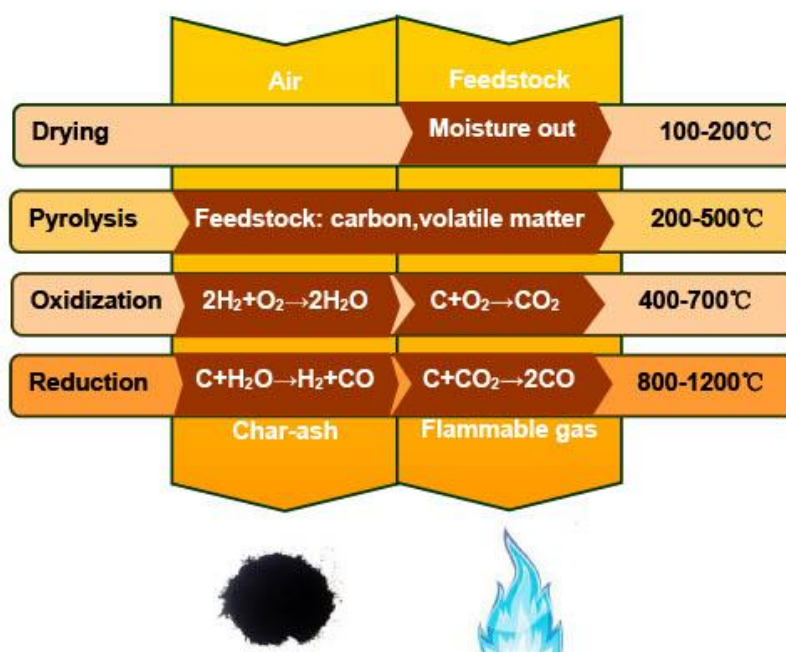


青 岛 科 信 新 能 源 技 术 有 限 公 司
Qingdao Kexin New Energy Technology Co., Ltd

Telephone: 008613210769079, E-mail: wang@kexinqd.com

Principle of biomass gasification:

The biomass feedstock enters the reactor of the gasifier, is dried by heating, and then, as the temperature rises, the volatile matter is precipitated and pyrolyzed (cracked) at a high temperature, and the pyrolyzed gas and carbide are supplied in the oxidation zone. The air undergoes an oxidation reaction to produce CO₂ and water vapor, and the heat generated by the combustion is used to maintain the endothermic reaction of drying, pyrolysis, and reduction in the lower furnace body. The gas generated after combustion passes through the reduction zone and the carbonization zone ($C+CO_2=2CO$, $C+H_2O=H_2+CO$) in the furnace body to form a synthesis gas containing CO, H₂, CH₄, C_mH_n and the like.





青 岛 科 信 新 能 源 技 术 有 限 公 司
Qingdao Kexin New Energy Technology Co., Ltd

Telephone: 008613210769079, E-mail: wang@kexinqd.com

Biomass Raw Materials

The biomass syngas power generation system is applicable to various kinds of biomass straws, such as peanut shell, rice shell, corncob, cotton straw, corn straw, wood chips, branches, and other wood materials, organic urban garbage, cow dung, industrial organic garbage, such as plastic, rubber, cloth, paper shell, etc. (the total content of plastic and rubber is less than 30%).

The requirements of biomass gasifier for raw materials are as follows:

- 1) Requirements for raw material size: biomass raw material in block or particle shape $\leq 30\text{mm}$
- 2) . moisture content of raw material: $\leq 20\%$.

ORGANIC WASTE MATERIALS





青 岛 科 信 新 能 源 技 术 有 限 公 司
Qingdao Kexin New Energy Technology Co., Ltd

Telephone: 008613210769079, E-mail: wang@kexinqd.com

Characteristics of downdraft and fluidized bed biomass gasifier:

1. Down-suction fluidized bed gasification system. Strong adaptability to raw materials, as long as the size of survival material raw materials $\leq 30\text{mm}$, water content $\leq 20\%$.
2. Cleaning system, using dry purification technology, avoid water and environmental pollution.
- 3, the control system adopts PLC intelligent control system, automatic work. Achieve intelligent control of biomass gasifier output biomass syngas, automatic control of feeding and ash removal, automatic sewage discharge, biomass gasifier can work continuously for a long time (can work continuously for 500 hours). The intelligent control of the output of biomass synthetic gas can meet the needs of power generation equipment fluctuation, and ensure the perfect flexible cooperation between biomass gasification and power generation equipment operation.
4. System structure design is compact, modular unit installation, convenient transportation. The modular system greatly saves 90% EPC engineering volume, and the equipment arrangement and commissioning can be completed in 1 month.
5. The overall use of carbon steel, key parts of the use of 316L and 304 stainless steel, copper pipe. Corrosion resistance, high temperature resistance, oxidation resistance, improve the service life of the equipment, can reach more than 20 years.
6. The emission is friendly to the environment and can meet the CE standard.
7. Abundant derivatives. In addition to electricity, biomass gas, biomass carbon, biomass oil and wood vinegar can also be obtained through gasification.
For example: consume 1KG of wood can get
Power 1.1-1.2KW
Biomass gas 2m³/h
Calorific value: 5.8-6.25MJ
Biomass carbon: 0.3Kg
8. High utilization rate of waste heat, which can reach more than 85%. Used to provide heat for drying/cogeneration etc
9. Internal electrical components are all international first-line brands, long service life. Later can be repaired and replaced in the customer's local area, reducing after-sales costs
10. Low tar content (10mg/Nm³), can ensure the stable operation of the engine.



青 岛 科 信 新 能 源 技 术 有 限 公 司
Qingdao Kexin New Energy Technology Co., Ltd

Telephone: 008613210769079, E-mail: wang@kexinqd.com

Specification Parameters

Item	Biomass gasifier	Generating unit
30KW Power Generation System	KX-100SC (Fluidized bed type) Specifications 1. Gas output: 100m ³ /h 2. Gas caloric value: 4600-5200KJ/m ³ 3. Gasification efficiency: >75% 4. Power supply: 380V50Hz 5. Material feeding consumption: 45Kg/H 6. Suitable for power generation: 30KW 7. Installation size: (Length × width × height) 14m×3.5m×5.2m	30KW generating unit Speed: 1500 rpm Displacement: 6.5L Cylinder Number: 6. Bore×Stroke: 110×135mm
50KW Power Generation System	KX-150SC (Fluidized bed type) Specifications 1. Gas output: 150m ³ /h 2. Gas caloric value: 4600-5200KJ/m ³ 3. Gasification efficiency: >75% 4. Power supply: 380V50Hz 5. Material feeding consumption: 75Kg/H 6. Suitable for power generation: 50KW 7. Installation size: (Length × width × height) 14m×4.5m×5.8m	50KW generating unit Speed: 1500 rpm Displacement: 9.726L Cylinder Number: 6. Bore×Stroke: 126mm×130mm
100KW Power Generation System	KX-300SC (Fluidized bed type) Specifications 1. Gas output: 300m ³ /h 2. Gas caloric value: 4600-5200KJ/m ³ 3. Gasification efficiency: >75% 4. Power supply: 380V50Hz 5. Material feeding consumption: 150Kg/H 6. Suitable for power generation: 100KW 7. Installation size: (Length × width × height) 14m×3.5m×5.2m	100KW generating unit Speed: 1500 rpm Displacement: 11.8L Cylinder Number: 6. Bore×Stroke: 128mm×152mm
150KW Power Generation System	KX-450SC (Fluidized bed type) Specifications 1. Gas output: 450m ³ /h 2. Gas caloric value: 4600-5200KJ/m ³ 3. Gasification efficiency: >75% 4. Power supply: 380V50Hz 5. Material feeding consumption: 225Kg/H 6. Suitable for power generation: 150KW 7. Installation size: (Length × width × height) 14m×4.5m×5.8m	150KW generating unit Speed: 1000 rpm Displacement: 16.3L Cylinder Number: 6. Bore×Stroke: 145mm×165mm



青 岛 科 信 新 能 源 技 术 有 限 公 司
Qingdao Kexin New Energy Technology Co., Ltd

Telephone: 008613210769079, E-mail: wang@kexinqd.com

200KW Power Generation System	KX-600SC(Fluidized bed type) Specifications 1. Gas output: 600m³/h 2. Gas caloric value: 4600-5200KJ/m³ 3. Gasification efficiency: >75% 4. Power supply: 380V50Hz 5. Material feeding consumption: 300Kg/H 6. Suitable for power generation: 200KW 7. Installation size: (Length × width × height) 15.8m×4.5m×6m	200KW generating unit Speed: 1000 rpm Displacement: 19.6L Cylinder Number: 6. Bore×Stroke: 152mm×180mm
250KW Power Generation System	KX-750SC (Fluidized bed type) Specifications 1. Gas output: 750m³/h 2. Gas caloric value: 4600-5200KJ/m³ 3. Gasification efficiency: >75% 4. Power supply: 380V50Hz 5. Material feeding consumption: 375kg/h 6. Suitable for power generation: 250KW 7. Installation size: (Length × width × height) 21m×5m×6.4m	250KW generating unit Speed: 1000 rpm Displacement: 19.6L Cylinder Number: L6. Bore×Stroke: 152x180mm
300KW Power Generation System	KX-900SC (Fluidized bed type) Specifications 1. Gas output: 900m³/h 2. Gas caloric value: 4600-5200KJ/m³ 3. Gasification efficiency: >75% 4. Power supply: 380V50Hz 5. Material feeding consumption: 450Kg/H 6. Suitable for power generation: 300KW 7. Installation size: (Length × width × height) 22.94m×5.2m×6m	300KW generating unit Speed: 1000 rpm Displacement: 36.3L Cylinder Number: 8. Bore×Stroke: 170mm×200mm
400KW Power Generation System	KX-1200SC (Fluidized bed type) Specification 1. Gas output: 1200m³/h 2. Gas caloric value: 4600-5200KJ/m³ 3. Gasification efficiency: >75% 4. Power supply: 380V50Hz 5. Material feeding consumption: 600Kg/H 6. Suitable for power generation: 400KW 7. Installation size: (Length × width × height) 24.8m×5.2m×6.4m	400KW generating unit Speed: 1000 rpm Displacement: 39.6L Cylinder Number: 6. Bore×Stroke: 200mm×210mm



青 岛 科 信 新 能 源 技 术 有 限 公 司
Qingdao Kexin New Energy Technology Co., Ltd

Telephone: 008613210769079, E-mail: wang@kexinqd.com

500KW Power Generation System	KX-1500SC (Fluidized bed type) Specifications 1. Gas output: 1500m³/h 2. Gas caloric value: 4600-5200KJ/m³ 3. Gasification efficiency: >75% 4. Power supply: 380V50Hz 5. Material feeding consumption: 750Kg/H 6. Suitable for power generation: 500KW 7. Installation size: (Length × width × height) 29.1m×5.86m×7.2m	2×250KW generating unit Speed: 1000 rpm Displacement: 36.3L Cylinder Number: 8. Bore×Stroke: 170mm×200mm
--	---	---

Turnkey Solutions

We have many successful projects around the world. Like Italy, Russia, Korea, Germany, Japan, Singapore, Papua New Guinea, Columbia, Norway, America, Taiwan etc.



Singapore 30KW Power Plant Project



Italy 200KW Power Plant Project



Russian 100KW Power Plant Project



Taiwan, China 400KW Power Plant Project



Papua New Guinea 500KW Power Plant Project



Japan 30KW Power Plant Project