

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* AVANÇADO ARCOS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Dione da Silva Melo
Lorena Cremonin de Lima

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE
RESÍDUO SÓLIDO URBANO: Uma análise do potencial
energético da Cidade de Arcos (MG)**

Arcos
2025

DIONE DA SILVA MELO
LORENA CREMONIN DE LIMA

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUO SÓLIDO
URBANO: Uma análise do potencial energético da Cidade de Arcos (MG)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* Arcos, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio.

Arcos

2025

Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - Campus Arcos

M528g Melo, Dione da Silva.

Geração de energia elétrica a partir de resíduo sólido urbano: uma análise do potencial energético da cidade de Arcos (MG). / Dione da Silva Melo, Lorena Cremonin de Lima. - Arcos, 2025. 77 f. : il. color.

Orientador: Ricardo Carrasco Carpio.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus Arcos*.

1. Resíduos Orgânicos I. Carpio, Ricardo Carrasco (orientador). II. Lima, Lorena Cremonin. IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus Arcos*. V. Título.

CDD 631.86

Catálogo: Meriely Ferreira de Almeida - CRB-6/2760

Dione da Silva Melo
Lorena Cremonin de Lima

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUO SÓLIDO
URBANO: Uma análise do potencial energético da Cidade de Arcos (MG)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do
Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* Arcos,
como requisito à obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: ____/ ____/ _____ pela banca examinadora.

Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio - IFMG Campus ARCOS (Orientador)

Prof. Dr. Marcos Paulo Gonçalves Pedroso - IFMG Campus ARCOS

Prof. Dr. Reginaldo Gonçalves Leao Junior - IFMG Campus ARCOS

Prof. Dr. Diego Luis Izidoro Silva- IFMG Campus FORMIGA

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me apoiou, foi minha base e acreditou em meus sonhos. Agradeço, em especial, à minha companheira, Mariana, pelo amor e companheirismo, fundamentais ao longo desta jornada. (Dione Melo)

Dedico este trabalho aos meus pais, que, mesmo à distância, foram meu alicerce e minha maior fonte de força, e ao Jefferson, meu companheiro, pela parceria e pelo carinho que marcaram essa trajetória. (Lorena Cremonin)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a Deus, que nos concedeu força e saúde para dar continuidade aos nossos estudos e possibilitou a conclusão deste projeto.

Ao nosso orientador, Professor Ricardo Carrasco, expressamos nossa gratidão pelo apoio constante, pelo conhecimento compartilhado, pelo tempo dedicado ao desenvolvimento deste trabalho e pelo incentivo ao longo de todo o processo.

Aos professores do IFMG Campus Arcos, agradecemos pelos ensinamentos, pela troca de experiências e por apresentarem as diversas facetas da Engenharia Mecânica, fundamentais para nossa formação acadêmica. Nosso reconhecimento a todo o corpo docente. À equipe do IFMG Campus Arcos, deixamos nosso agradecimento pelo auxílio, pelos momentos de convivência e pelos diálogos compartilhados ao longo da graduação. Os incentivos constantes e o apoio prestado tornaram nossa jornada mais acolhedora.

Agradeço aos meus familiares e, principalmente, aos meus pais, que apoiaram minhas escolhas. Mesmo estando distantes na maior parte do tempo, seu apoio e suas palavras de conforto foram essenciais para que eu me reerguesse em diversos momentos difíceis. Agradeço, em especial, à minha companheira de vida, Mariana, que esteve ao meu lado em longos debates, encorajando-me e confiando em mim mesmo nos momentos em que me senti perdido. Agradeço também à minha colega de longa data, Lorena, pela parceria construída ao longo dos anos, pelos dias difíceis compartilhados, pelos longos períodos de estudo e pelo companheirismo em nossos projetos, especialmente nesta etapa de conclusão. (Dione Melo)

Meu agradecimento mais profundo é aos meus pais, que, mesmo à distância, nunca deixaram de estar presentes. Estar longe de casa ao longo deste percurso acadêmico foi um dos maiores desafios enfrentados, marcado por momentos de saudade, cansaço e incertezas. Ainda assim, o apoio constante, as palavras de incentivo e a confiança que sempre depositaram em mim foram fundamentais para que eu seguisse em frente. Tudo o que conquistei até aqui carrega o esforço, o amor e a força que recebi deles, mesmo quando o abraço precisou ser apenas em pensamento. Ao Jefferson, meu companheiro, agradeço por caminhar ao meu lado durante esta etapa tão exigente. Sua paciência, compreensão e presença foram essenciais nos momentos de maior pressão, quando o desânimo surgia e a motivação parecia falhar. Registro também meu agradecimento ao Dione, meu colega de projetos, pela parceria construída ao longo da graduação e consolidada na elaboração deste trabalho. A convivência diária, a troca de ideias, os desafios compartilhados e o comprometimento mútuo foram determinantes para a conclusão deste projeto e para o amadurecimento acadêmico ao longo dessa trajetória. (Lorena Cremonin)

Por fim, agradecemos a todos que, de alguma forma, estiveram presentes em nosso dia a dia. Obrigado pelas conversas, pela convivência e por tornarem essa etapa uma memória que guardaremos com carinho.

RESUMO

Este trabalho analisa o potencial de geração de energia elétrica via conversão térmica de resíduos do inglês *Waste-to-Energy* (WtE), com foco na fração orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) do município de Arcos, Minas Gerais. A pesquisa contextualiza a gestão de RSU no Brasil e em Arcos, correlacionando o crescimento populacional à exaustão da vida útil dos aterros sanitários. Metodologicamente, adotou-se a rota de combustão direta da matéria orgânica para a análise do potencial energético, fundamentando os cálculos termodinâmicos nos princípios do Ciclo Rankine ideal. Para a estimativa do calor liberado, utilizou-se o Poder Calorífico Inferior (PCI) da biomassa, avaliando dois cenários de teor de umidade: 40% (condição ideal) e 70% (condição crítica), permitindo quantificar a sensibilidade da geração elétrica frente às variações na composição do combustível. Os resultados demonstram uma capacidade de recuperação energética de 17,68 MWh/dia para o cenário de 40% de umidade e de 7,21 MWh/dia para o de 70%, representando um suprimento da demanda elétrica municipal de 5,39% e 2,19%, respectivamente. Conclui-se que a valorização energética dos resíduos orgânicos em Arcos apresenta-se como uma solução estratégica e sustentável, capaz de diversificar a matriz energética local, mitigar riscos de poluição e estender significativamente a vida útil do aterro sanitário municipal através do redirecionamento do volume de massa orgânica.

Palavras-chave: Resíduo Sólido Urbano (RSU). Resíduo Orgânico. Ciclo Rankine. Combustão. *Waste-to-Energy*.

ABSTRACT

This study analyzes the potential for generating electricity through thermal conversion of waste, known as Waste-to-Energy (WtE), focusing on the organic fraction of Municipal Solid Waste (MSW) in the municipality of Arcos, Minas Gerais. The research contextualizes MSW management in Brazil and Arcos, correlating population growth with the exhaustion of the useful life of landfills. Methodologically, direct combustion of organic matter was adopted for the analysis of energy potential, basing thermodynamic calculations on the principles of the ideal Rankine cycle. To estimate the heat released, the Lower Heating Value (LHV) of the biomass was used, evaluating two moisture content scenarios: 40% (ideal condition) and 70% (critical condition), allowing the sensitivity of electricity generation to variations in fuel composition to be quantified. The results show an energy recovery capacity of 17.68 MWh/day for the 40% humidity scenario and 7.21 MWh/day for the 70% scenario, representing a supply of 5.39% and 2.19% of municipal electricity demand, respectively. It can be concluded that the energy recovery of organic waste in Arcos is a strategic and sustainable solution, capable of diversifying the local energy matrix, mitigating pollution risks, and significantly extending the useful life of the municipal landfill by redirecting the volume of organic matter.

Keywords: Municipal Solid Waste (MSW). Organic Waste. Rankine Cycle. Combustion. Waste-to-Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Participação de Cada Região na Produção de RSU	19
Figura 1.2 – Porcentagem da população em cada região do país	19
Figura 1.3 – Evolução do consumo de energia X Setores de consumo	21
Figura 2.1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	25
Figura 2.2 – Matriz elétrica mundial	26
Figura 3.1 – Aterro sanitário	36
Figura 3.2 – Lixão a céu aberto	37
Figura 3.3 – Cidade de Arcos - MG	41
Figura 5.1 – Usina termoeletrica	49
Figura 5.2 – Modelo do Ciclo Rankine	50
Figura 5.3 – Gráfico de saturação de um ciclo Rankine	50
Figura 5.4 – Variação do Ciclo Rankine	56
Figura 5.5 – Ciclo Rankine com reaquecimento	56
Figura 5.6 – Ciclo Rankine com regeneração	57
Figura 5.7 – Caldeira do tipo aquatubular	58
Figura 6.1 – Análise da variação da pressão da caldeira	68
Figura 6.2 – Análise da variação da pressão do condensador	68
Figura 6.3 – Análise da variação da temperatura máxima do vapor	69
Figura 6.4 – Potência máxima de produção em cada cenário	71
Figura 6.5 – Potência máxima de produção em cada cenário com 70% de umidade na matéria orgânica	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Métodos de tratamento e destinação final do RSU no Brasil e em Minas Gerais	32
Tabela 3.2 – Composição química de resíduos orgânicos	34
Tabela 4.1 – Distribuição de Usinas RSU por UF e Combustível	45
Tabela 5.1 – Eficiência dos componentes para os cálculos	59
Tabela 5.2 – Potencial energético e energia elétrica bruta gerada por diferentes abordagens	63
Tabela 5.3 – Parâmetros da análise	64
Tabela 6.1 – Estimativa para a população de Arcos nos cenários atual e futuro	65
Tabela 6.2 – Valores de RSU e RSO estimados para diferentes anos	66
Tabela 6.3 – Resultados do balanço energético da combustão da fração orgânica com 40% de umidade	66
Tabela 6.4 – Resultados do balanço energético da combustão da fração orgânica com 70% de umidade	67
Tabela 6.5 – Potencial de eletricidade gerada	72
Tabela 6.6 – Capacidade de suprir a cidade	73
Tabela 6.7 – Potencial de eletricidade gerada, 70% de umidade na matéria orgânica	73
Tabela 6.8 – Capacidade de suprir a cidade	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	Food and Agriculture Organization
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IAS	Instituto Água e Saneamento
IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
ISWA	International Solid Waste Association
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ICRG	Instituto Carlos Roberto Hansen
MG	Minas Gerais
MSW	Municipal Solid Waste
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBR	Norma Brasileira Registrada
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OLR	Organic Loading Rate
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSO	Resíduo Sólido Orgânico
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNEP	United Nations Environment Programme
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras gregas

η_t	Eficiência térmica
η_T	Eficiência turbina
η_B	Eficiência bomba
η_c	Eficiência caldeira
η_g	Eficiência gerador

Subscritos ou Sobrescritos

\cdot	Taxa ou vazão mássica
ent	Condição de entrada
sai	Condição de saída
liq	Líquido
r	Real
s	Isentrópico
$disp$	Disponível
$comb$	Combustível
vap	Vapor
t	Térmica
T	Turbina
B	Bomba
c	Caldeira
g	Gerador

Fórmulas químicas

C	Carbono
H	Hidrogênio
O	Oxigênio
N	Nitrogênio
S	Enxofre
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
H ₂ O	Água
SO ₂	Dióxido de enxofre

Grandezas físico-químicas

kWh	Quilowatt-hora
MPa	Mega pascal
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
kg	Quilograma
q	Calor específico
w	Trabalho específico
h	Entalpia específica
m	Massa
Q	Calor
hab	Habitantes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Motivação do trabalho	18
1.2	Justificativa	20
1.3	Objetivos	21
1.3.1	Objetivo Geral	21
1.3.2	Objetivos específicos	22
2	SUSTENTABILIDADE E MEIO AMBIENTE NO CONTEXTO DO RSU	23
2.1	Introdução	23
2.2	Geração sustentável de eletricidade	24
2.3	Sustentabilidade aplicada no contexto do RSU	27
2.4	Políticas públicas e legislações ambientais	27
2.5	Valorização Energética e Inovação no Tratamento de Resíduos	28
2.6	Desafios e perspectivas futuras	28
3	RESÍDUO SOLIDO URBANO (RSU) E RESÍDUO SÓLIDO ORGÂNICO (RSO)	29
3.1	Resíduo Sólido Urbano	29
3.1.1	Definição e classificação	29

3.1.2	Obtenção de dados	30
3.1.3	Caracterização do RSU: composição, origem e fatores de geração	31
3.1.4	Tratamento e destinação do RSU no Brasil e em Minas Gerais	31
3.2	RSO: definição, fontes e importância para a geração de energia elétrica	33
3.2.1	Principais fontes geradoras de RSO e potencial energético . . .	33
3.2.2	Composição da matéria orgânica presente no RSU	33
3.3	Motivação da escolha dos resíduos orgânicos	35
3.4	Aterros Sanitários	35
3.4.1	Panorama da geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos	38
3.4.2	Vida útil	38
3.4.3	Medidas para evitar a superlotação de aterros	39
3.5	Expectativa de crescimento populacional	39
3.5.1	Produção de RSU	40
3.6	O Contexto da cidade de Arcos - MG e seu Aterro Sanitário .	40
3.6.1	Cidade de Arcos - MG	40
3.6.2	Cenário do tratamento e destinação do RSU na cidade de Arcos	41
3.6.3	Estimativa de consumo elétrico da cidade de Arcos	41
4	POTENCIAL ENERGÉTICO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO	43
4.1	Tecnologias para a conversão do RSU orgânico em energia elétrica	43

4.2	Análise comparativa das tecnologias: eficiência, custos, impactos ambientais e aplicabilidade	45
5	USINAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A VAPOR	48
5.1	Usinas a vapor	48
5.2	Ciclo de potência a vapor	49
5.3	Energia da combustão	51
5.3.1	Calor liberado	52
5.3.2	Poder calorífico superior e inferior	53
5.4	Eficiência do Ciclo Rankine	55
5.4.1	Ciclo de análise	56
5.5	Eficiências a serem utilizadas	57
5.6	Pressão e temperatura de trabalho	59
5.6.1	Turbinas a vapor	60
5.6.2	Incineradores com recuperação de calor	60
5.6.3	Condensador	60
5.7	Cálculos termodinâmicos	61
5.7.1	Estimativa de eletricidade gerada	62
5.8	Formulação de análise	63
6	RESULTADOS	65
6.1	Estimativa de Produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) .	65

6.1.1	Estimativa de Crescimento Populacional em Arcos-MG	65
6.1.2	Cálculo de RSU e RSO	65
6.2	Calor liberado pela combustão do resíduo orgânico	66
6.3	Estudo do potencial elétrico gerado	67
6.3.1	Efeito da variação da pressão	67
6.3.2	Efeito da variação da pressão do condensador	68
6.3.3	Efeito da variação da temperatura máxima do vapor	69
6.3.4	Potência base de geração elétrica e sensibilidade à variação de RSU	70
6.4	Potencial de energia elétrica gerada	72
7	CONCLUSÃO	75
7.1	Sugestões para trabalhos futuros	76
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo são apresentados a motivação do trabalho as justificativas para a realização do estudo e por último os objetivos, geral e específicos do trabalho.

1.1 Motivação do trabalho

O aumento populacional impulsiona debates em diversas esferas, como a social, a econômica e a arquitetônica. Contudo, para a gestão eficiente de cidades, sejam elas pequenas ou grandes, dois pontos se destacam como cruciais, o crescimento do consumo energético e a elevação da produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). A necessidade de implementar métodos para amenizar esses problemas, intrinsecamente ligados ao crescimento populacional, é evidente e urgente. Uma solução promissora reside na utilização de parte do RSU para a geração de energia elétrica, o que simultaneamente ameniza ambas as questões. Essa abordagem, que consiste na conversão de resíduos em energia (WtE, do inglês *Waste-to-Energy*), já é adotada em diversos países ao redor do mundo como um caminho estratégico para a destinação final do resíduo gerado nas cidades.

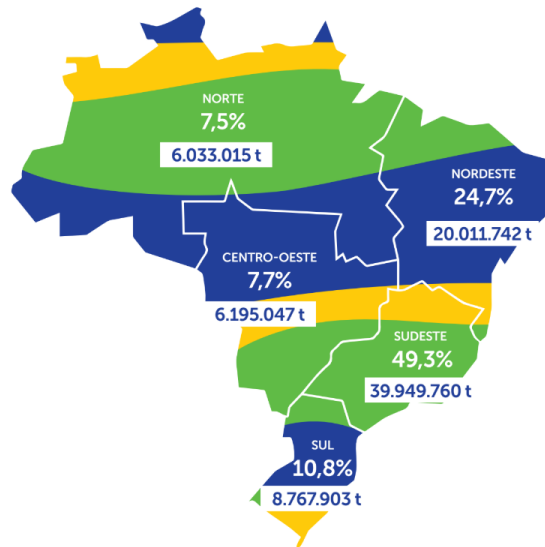
Grande parte do RSU gerado no Brasil é destinada a lixões, descartes irregulares ou aterros sanitários licenciados. Do total de resíduos coletados, 61% são destinados a aterros, enquanto 39% são descartados de forma inadequada (BRASIL, 2025). Nesses locais, o biogás resultante da decomposição anaeróbica, quando desprovido de tratamento ou aproveitamento energético, é liberado para a atmosfera. Os gases que o compõem, predominantemente o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2), intensificam o efeito estufa. Conforme Rodrigues et al. (2024), o metano apresenta um potencial de aquecimento global 25 vezes superior ao do dióxido de carbono, sendo responsável por aproximadamente 3% das emissões globais de gases de efeito estufa.

A análise das principais regiões do país quanto à geração de RSU, apresentada pelo ABREMA (2024), revela que a região Sudeste se mantém como a maior produtora de RSU no Brasil, registrando um aumento de 0,6% na produção em 2023. Em comparação com os dados levantados no Barema 2023, a geração média per capita na região Sudeste passou de 449 kg de RSU por habitante em 2022 para 452 kg em 2023. Em contraste, a região Sul, com a menor produção de RSU no país, manteve a média de 284 kg por habitante por ano.

A Figura 1.1 ilustra a porcentagem de participação de cada região brasileira na produção de RSU. Adicionalmente, a Figura 1.2 apresenta a distribuição percentual da população brasileira por região, com base no censo realizado em 2022, o qual registrou um total de 203.080.756 habitantes no país. A comparação entre os dados apresentados nas duas figuras permite identificar uma relação direta entre a distribuição populacional e a

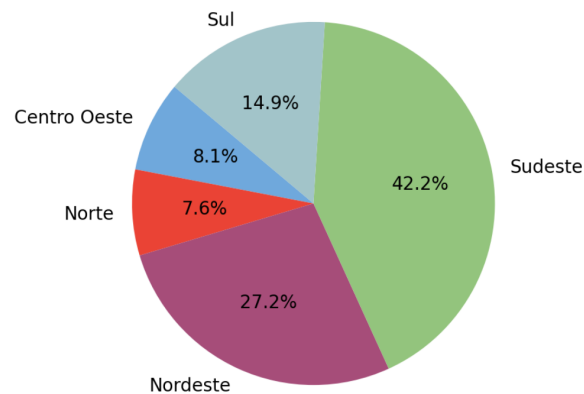
geração de resíduos sólidos urbanos nas diferentes regiões do Brasil.

Figura 1.1 – Participação de Cada Região na Produção de RSU



Fonte: ABREMA, 2024.

Figura 1.2 – Porcentagem da população em cada região do país



Fonte: Adaptado de IBGE, 2022a.

A intensificação na geração de resíduos, impulsionada pelo crescimento demográfico, é acompanhada por um aumento proporcional na demanda por energia elétrica. Segundo dados da EPE (2024), o consumo nacional em 2023 atingiu 616 TWh, o que representa uma elevação de 5,2% em comparação ao ano anterior. Esse crescimento não se restringe ao uso doméstico direto, mas engloba também as necessidades geradas pela expansão populacional em setores como a indústria, serviços públicos e a agropecuária.

Considerando todos os pontos levantados até então, a utilização do RSU se torna uma grande opção para a produção de energia elétrica, utilizando uma parte de sua composição como fonte térmica. A conversão de uma fonte térmica em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica torna-se possível através de dispositivos especiais

chamados de máquinas térmicas. Segundo Çengel e Boles (2013, p. 280) as máquinas térmicas podem se diferenciar entre si, mas sempre assumem as mesmas características:

1. Elas recebem calor de uma fonte à alta temperatura.
2. Parte do calor é transformado em trabalho mecânico.
3. O calor excedente não utilizado é descartado em um sumidouro térmico.
4. Esses equipamentos operam em ciclos contínuos.

Máquinas térmicas capazes de utilizar o RSU como combustível são equipamentos que utilizam para o seu funcionamento a geração de vapor, como as turbinas a vapor em um ciclo de potência chamado de ciclo Rankine. O RSU pode ser utilizado como fonte térmica para as caldeiras de vapor que movimentam turbinas a vapor, gerando eletricidade.

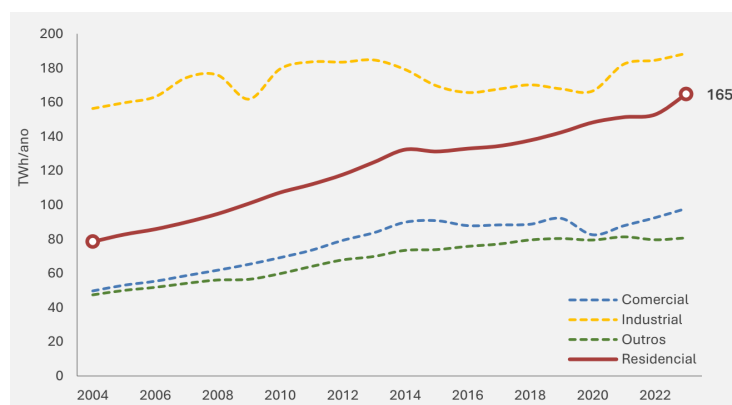
Com as informações apresentadas até o momento, torna-se evidente a necessidade de diversificar a matriz energética do país, assim como dar uma nova destinação aos resíduos sólidos urbanos. A utilização do RSU é um meio sustentável e viável para abranger ambas as necessidades do Brasil, redirecionando o fluxo de material que seria descartado e gerando energia a partir desses materiais.

1.2 Justificativa

Conforme apontado por IBGE (2023) com base no Censo de 2022, a população brasileira registrou um aumento de 6,5% entre 2010 e 2022, totalizando 203,1 milhões de habitantes. Em contraste, dados divulgados no final de agosto de 2024 por Brasil (2024) indicam que a população alcançou 212,6 milhões de pessoas naquele período, representando um acréscimo de 4,67% em apenas dois anos.

Em análise do crescimento da população humana, observa-se uma redução progressiva da vida útil dos aterros sanitários, um cenário agravado pelo aumento da geração de lixo que acompanha a expansão demográfica. O descarte de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros representa uma medida paliativa para a destinação dos resíduos gerados pela sociedade, contudo, a problemática central reside na capacidade limitada desses locais de disposição final. Em uma associação simples, a vida útil de um aterro sanitário é diretamente proporcional ao volume de material que ele é capaz de suportar.

Outro fator significativamente influenciado pelo crescimento populacional é a crescente demanda por energia elétrica. Conforme dados da EPE (2025a), o Brasil registrou uma média de crescimento anual no consumo residencial de energia elétrica de 4% ao longo de 20 anos de análise. O Gráfico 1.3 ilustra a evolução do consumo de energia nos diversos setores do país entre 2002 e 2023, evidenciando que o crescimento do setor residencial mais que dobrou no período examinado.

Figura 1.3 – Evolução do consumo de energia X Setores de consumo

Fonte: EPE, 2025a.

A problemática da superprodução de RSU se intensifica em grandes centros urbanos, onde a elevada densidade demográfica impõe desafios significativamente maiores à gestão dos resíduos gerados. Diante desse cenário, emerge a utilização desses resíduos como uma potencial fonte energética, agregando à matriz energética nacional uma alternativa sustentável de geração. Essa abordagem não apenas promove a melhoria das condições ambientais, mas também proporciona um alívio para o setor energético.

A temática da valorização energética do RSU tem sido objeto de debate no Brasil há algum tempo, transcendendo a visão do lixo como um mero problema a ser solucionado para reconhecê-lo como um possível meio de solução. Enquanto no Brasil cerca de 96% dos resíduos urbanos são destinados a lixões e aterros, na Europa, por exemplo, aproximadamente 50% dos resíduos gerados são direcionados à incineração (BRASIL, 2021).

Portanto, a implementação de tecnologias para a valorização energética do resíduo sólido urbano (RSU) no aterro sanitário de Arcos merece estudo e avaliação criteriosa. Considerando que o município já dispõe dessa infraestrutura de destinação final, o aproveitamento de uma parcela do RSU para a geração de energia elétrica apresenta o potencial de gerar economia no consumo elétrico local e simultaneamente, reduzir a carga de resíduos a ser suportada pelo aterro. Essa abordagem pode contribuir significativamente para uma distribuição de energia mais econômica à população e para a mitigação da poluição ambiental decorrente do lixo produzido na cidade.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise técnica para determinar o potencial de geração de energia elétrica a partir da fração mássica orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos produzidos na cidade de Arcos, Minas Gerais.

1.3.2 Objetivos específicos

- Levantar e caracterizar a composição e produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), com ênfase na fração orgânica.
- Realizar um levantamento bibliográfico sobre o ciclo de potência de vapor, Ciclo Rankine.
- Projetar a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) da cidade de Arcos para embasar os cálculos do potencial energético.
- Determinar o potencial energético disponível e geráveis a partir da fração orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos no município de Arcos (MG) nos cenários atual e futuro.

2 SUSTENTABILIDADE E MEIO AMBIENTE NO CONTEXTO DO RSU

2.1 Introdução

Os resíduos gerados pela atividade humana, conhecidos popularmente como lixo, consistem em uma complexa mistura de materiais de origens e composições variadas. Essencialmente, um resíduo é qualquer material orgânico ou inorgânico que é descartado por não possuir mais utilidade. Para fins de gestão, eles são classificados em resíduos aproveitáveis: aqueles que podem ser reciclados ou reutilizados e rejeitos: materiais que não têm possibilidade de reaproveitamento e devem ir para aterros (CAMPOS, 2025).

A produção de resíduos acompanha a humanidade desde o seu início. Durante a fase nômade, os resíduos eram predominantemente orgânicos e se decompunham naturalmente, não constituindo um problema. Com a sedentarização, impulsionada pelo manejo de animais e agricultura, a produção de lixo demandou manejo, mas o problema era facilmente gerenciado, principalmente pela incineração.

Entretanto, a chegada da industrialização e o crescimento urbano agravaram a questão do lixo. A produção de materiais que não eram facilmente descartáveis ou incineráveis intensificou o problema, embora o desenvolvimento econômico fosse priorizado em detrimento do controle dos seus efeitos (UFMG, s.d.).

A coleta e a destinação correta desse material tornaram-se relevantes em meados do século XX, impulsionadas pelo aumento da industrialização e pelo agravamento do impacto nas grandes cidades. Esse cenário levou ao reconhecimento do tratamento adequado de resíduos como uma necessidade essencial para a qualidade de vida humana (DAMAEQ, 2025).

A partir desse ponto, as consequências da produção e do descarte desses resíduos podem ser observadas até os dias atuais. Com o aumento na geração desses materiais, a necessidade de criar novos locais de descarte cresceu com o passar do tempo, o que levou à criação de inúmeros centros de disposição, como aterros sanitários com controle de proteção contra contaminações gerais, mas também resultou no descarte irregular em lixões a céu aberto, que são prejudiciais em vários aspectos.

A geração de resíduos pela humanidade já é motivo de preocupação há muito tempo, e a previsão futura de produção causa preocupações ainda maiores. De acordo com a publicação de Boehm (2024), a produção de resíduos domiciliares deve aumentar cerca de 80%, passando de 2,1 para 3,8 bilhões de toneladas ao ano, em comparação entre 2020 e 2050, respectivamente. Nesse cenário, a expectativa favorável para a produção de resíduos situa-se na faixa de 2 bilhões de toneladas ao ano. No contexto mundial, cerca de 40% do lixo produzido ainda é encaminhado para locais inadequados.

O aumento na produção de resíduos torna-se cada vez mais preocupante, e a busca

por medidas de reciclagem e diminuição da produção de resíduos se torna uma discussão cada vez mais importante. O Brasil vem se desenvolvendo na questão da reciclagem do lixo produzido. De acordo com Jornal Nacional (2024), o Brasil saiu de 3,5% para 8% de reciclagem em todo o lixo produzido. Embora esse crescimento seja um fator benéfico para o país, ele ainda é um número muito inferior em comparação com o crescimento da produção nacional e, principalmente, em comparação com países vizinhos, onde esse número supera os 25% de reciclagem.

Sendo assim, a geração de resíduos configura-se como um agravante atual e um fator que, a longo prazo, se tornará um incômodo de proporções calamitosas. Por isso, a questão deve ser tratada de uma maneira mais sustentável para amenizar seus efeitos no futuro. A fim de interligar o resíduo gerado ao contexto da sustentabilidade, é necessário compreender as discussões sobre energia sustentável.

2.2 Geração sustentável de eletricidade

O desenvolvimento humano é marcado por uma ascensão tecnológica e produtiva muito rápida, em uma escala de tempo curta se comparada à existência do humano moderno. A evolução, o crescimento populacional e seus impactos sobre a natureza são altamente notáveis e preocupantes. Por este motivo, não há como conceber o desenvolvimento humano sem que a discussão sobre a sustentabilidade seja mencionada. É notório que o progresso possui um longo histórico de prejuízo ao meio ambiente, um fator que só recentemente foi tomado como importante na evolução humana (CASAGRANDE et al., 2011).

Atualmente, o desenvolvimento humano é pautado pelo conceito de desenvolvimento sustentável. Neste conceito, o ser humano não pensa somente no desenvolvimento favorável para a espécie, mas também leva em conta todo o meio ambiente. Desenvolvem-se, juntamente com o progresso, questões ecológicas, de sustentabilidade e uma produção limpa, que influenciam a população a um consumo sustentável e ecológico. A questão é que o meio ambiente entrou na contextualização do progresso há pouco tempo, tornando urgente a necessidade de protegê-lo, devido ao longo período em que foi negligenciado (CAMARGO, 2025).

Como tentativa de minimizar os efeitos dessa longa negligência ambiental, inúmeras políticas de diminuição de poluição, políticas de redução de emissão de carbono e políticas sustentáveis foram criadas. Como exemplo, tem-se o Protocolo de Quioto, um acordo entre diversos países que estabeleceu metas para a diminuição progressiva das emissões de gases poluentes na atmosfera. Adotado em 1997, o Protocolo não alcançou os resultados desejados. Contudo, os ideais trazidos por ele moldaram-se e reapareceram no Novo Acordo de Paris, em 2015, no qual os países se comprometeram a reduzir suas emissões de gases do efeito estufa (CAMARGO, 2025).

Ainda em 2015, um acordo foi assinado pelos 193 países membros da Cúpula

das Nações Unidas a chamada Agenda 2030. Essa Agenda é composta por 17 objetivos interconectados, englobando 169 metas com foco em superar desafios globais e promover o crescimento sustentável até o ano de 2030. Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como mostra a Figura 2.1, englobam desafios entre as esferas ambientais e sociais, sendo definidos de maneira interdependente, de modo que a concretização de um objetivo auxilia no alcance de outros (HABITABILITY, 2023).

Figura 2.1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

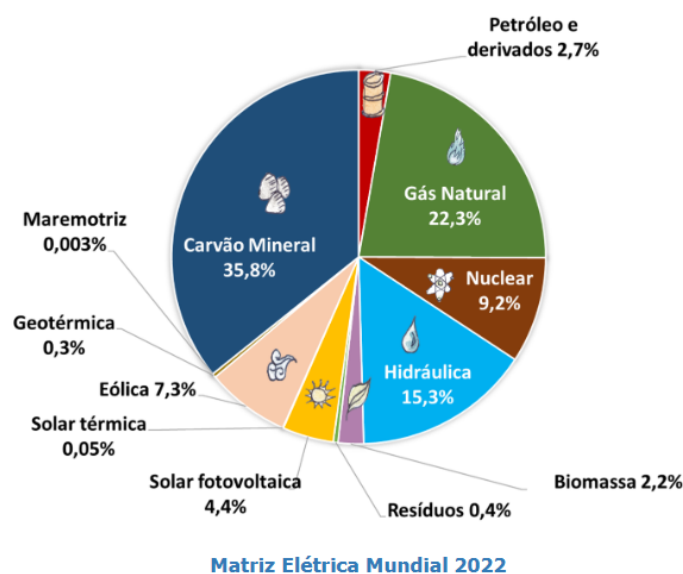


Fonte: ICRH, 2021.

Um dos objetivos cruciais da Agenda 2030 é a geração de Energia Elétrica Limpa e Acessível (ODS 7). Embora o Brasil apresente uma posição privilegiada quanto à capacidade instalada de usinas que utilizam fontes renováveis, como as hidrelétricas, a maioria dos países não possui condições geográficas favoráveis, dependendo de combustíveis fósseis para a maior parte de seu fornecimento elétrico. Mesmo no Brasil, que tem uma matriz predominantemente renovável, essas fontes fósseis ainda são utilizadas.

A energia é um dos desafios mais pertinentes na discussão sobre sustentabilidade. Os combustíveis fósseis foram a primeira e mais potente fonte de energia durante o avanço tecnológico, e a atual dependência global é resultado tanto da falta de desenvolvimento de meios alternativos quanto dos investimentos massivos em infraestrutura já realizados. Representando praticamente dois terços do consumo mundial para geração de eletricidade, os combustíveis fósseis advêm de fontes não renováveis e são altamente poluentes (CAMARGO, 2025). A matriz energética do mundo, vista na Figura 2.2, confirma a grande representatividade desses combustíveis e seus derivados.

Figura 2.2 – Matriz elétrica mundial



Fonte: EPE, 2025b.

Como visto na Figura 2.2, a participação de fontes não renováveis no mundo ainda é muito grande, e a dependência delas deve permanecer por um longo período. O principal fator que garante a soberania no uso de combustíveis fósseis reside, primeiramente, na dependência já estabelecida pela longa utilização e pelas tecnologias amplamente implantadas, e, em segundo lugar, na segurança de produção. Por ser um material físico e estocável, independente de fatores externos como o clima, sua geração de energia elétrica é constante, controlável e previsível, o que não se pode garantir integralmente na utilização de fontes renováveis e sustentáveis. Entretanto, esse tipo de fonte energética é muito poluente e um dos principais produtores de gases de efeito estufa.

Uma alternativa para mitigar a emissão de gases de efeito estufa na geração de energia elétrica é a adoção de tecnologias de geração mais limpa, renováveis e sustentáveis. Considera-se geração mais limpa aquela que apresenta uma redução significativa ou a ausência total de emissões de gases poluentes na atmosfera para sua aplicação e utilização. Por outro lado, a geração renovável baseia-se na utilização de fontes com capacidade de regeneração em curto prazo, englobando fontes como a hídrica, solar, eólica, maremotriz, geotérmica e a biomassa. Já a geração sustentável fundamenta-se na perpetuação do sistema, garantindo que sua produção seja viável ao longo do tempo, embora possa apresentar conflitos conceituais com a geração limpa. Contudo, é fundamental compreender que nem toda fonte considerada limpa é integralmente livre de impactos, visto que as etapas de fabricação e montagem dos componentes podem gerar gases que prejudicam o meio ambiente (PORTO et al., 2013).

A geração de energia elétrica sustentável pode e deve abranger áreas que normalmente não são exploradas. Uma ideia a ser trabalhada é a utilização de resíduos que, de outra forma, seriam descartados, transformando-os em energia útil, em vez de

simplesmente realizar o descarte e gerar um problema evitável. Um exemplo é a geração por biomassa, que se baseia no uso de matéria orgânica proveniente de resíduos florestais ou restos de colheitas para a produção de energia. Sua sustentabilidade se dá pelo fato de que esse material, que já seria descartado, é utilizado de uma forma mais útil e produtiva (IBERDROLA, 2025).

2.3 Sustentabilidade aplicada no contexto do RSU

Em relação aos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), o conceito de sustentabilidade envolve a adoção de planos de ação destinados a mitigar os danos ecológicos, que são resultados do descarte incorreto, e promovam a utilização eficiente dos recursos naturais. Conforme apontam Silva e Andrade (2022), essa perspectiva integra as dimensões econômica, social e ambiental, assegurando que a gestão dos resíduos ocorra de forma ética e em consonância com as diretrizes do desenvolvimento sustentável.

Para que o gerenciamento de resíduos seja verdadeiramente sustentável, é indispensável que ele considere a totalidade do ciclo de vida dos produtos, indo desde o seu design e fabricação até o uso e a disposição final. Desta forma, as prioridades operacionais se concentram na redução da geração de material, na reutilização, na reciclagem e na recuperação energética. Assim, as práticas se estabelecem no conhecido conceito dos "4Rs" (Reduzir, Reutilizar, Reciclar e Repensar), que serve de pilar fundamental de base tanto para as políticas públicas quanto as práticas empresariais focadas na sustentabilidade (MOURA; FERREIRA, 2023).

2.4 Políticas públicas e legislações ambientais

A inserção da sustentabilidade aplicada no manejo do RSU no Brasil ganhou destaque pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei nº 12.305/2010, estabelecendo princípios, objetivos instrumentos para garantir a gestão integrada e um gerenciamento ecologicamente correto desses materiais. A PNRS tem uma proposta da responsabilidade compartilhada sobre o ciclo de vida dos produtos, englobando um conjunto de atores, incluindo produtores, atacadistas, varejistas, consumidores e o poder público (BRASIL, 2010).

A PNRS incentiva a implementação de ferramentas operacionais, como a logística reversa. O mecanismo tem a finalidade de obter o recolhimento e o retorno de produtos e embalagens após o consumo, viabilizando o reaproveitamento ou a ambientação correta. Além disso, a Política Nacional incentiva o desenvolvimento da educação ambiental, essencial para mudanças comportamentais e conscientização social a respeito do descarte dos resíduos (SILVA et al., 2021).

2.5 Valorização Energética e Inovação no Tratamento de Resíduos

Para impulsionar a sustentabilidade no manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), a implementação de processos de valorização energética é um pilar fundamental. Inovações tecnológicas como a biodigestão anaeróbica para produção de biogás, a incineração com recuperação de calor (*Waste-to-Energy*) e o coprocessamento em fornos industriais representam soluções eficazes. Tais métodos contribuem significativamente para a redução do volume de rejeitos destinados a aterros sanitários e, simultaneamente, diversificam a matriz elétrica ao converter subprodutos em energia renovável (GOMES et al., 2024).

Essas inovações tecnológicas se alinham diretamente com o conceito da economia circular, propondo que os materiais sejam mantidos em seu ciclo de uso pelo máximo de tempo, diminuindo, assim, a necessidade de extração de recursos de matérias-primas e o descarte. A implementação dos conceitos da economia circular no âmbito industrial, tende a promover melhorias significativas na eficiência operacional, redução de custos e no fortalecimento da percepção de sustentabilidade corporativa (COSTA et al., 2023).

2.6 Desafios e perspectivas futuras

Embora tenha tido uma progressão da sustentabilidade no gerenciamento de RSU, ainda existem alguns obstáculos significativos em sua consolidação. Conforme dito por (IBGE, 2023), a evolução tem restrições por fatores como a insuficiência de uma infraestrutura necessária, a ausência de políticas públicas municipais e a participação da comunidade nas ações de separação e reciclagem.

As projeções futuras mostram a necessidade de uma integração entre avanços tecnológicos, educação ambiental e instrumentos de políticas públicas, buscando estabelecer uma gestão mais eficiente e participativa. O fortalecimento da coleta seletiva e a ampliação da utilização de resíduos como fonte energética são caminhos promissores para o desenvolvimento de grande potencial para uma sociedade ecologicamente correta (UNEP, 2024).

3 RESÍDUO SÓLIDO URBANO (RSU) E RESÍDUO SÓLIDO ORGÂNICO (RSO)

3.1 Resíduo Sólido Urbano

3.1.1 Definição e classificação

A definição de resíduo sólido urbano é designada como substâncias, materiais, objetos ou bens que são descartados. Os resíduos podem estar em estado sólido ou não, e sua destinação final precisa de um meio de tratamento específico, o qual evita danos à saúde pública e ao meio ambiente.

De acordo com Brasil (2010), seguindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, resíduos sólidos podem ser definidos como materiais, substâncias ou bens descartados que necessitam de destinação final adequada. A definição não é somente para resíduos em estado sólido ou semissólido, mas também gases que são armazenados em recipientes e líquidos que não podem ser descartados em redes de esgoto ou em corpos hídricos, por conta de suas propriedades (BRASIL, 2010).

A matéria do RSU é proveniente de residências, estabelecimentos, pontos comerciais, limpeza urbana, indústrias de pequeno porte, instituições privadas ou públicas, feiras livres, entre outros, não categorizando resíduos hospitalares ou de categoria com periculosidade e radioatividade, provenientes de indústrias pesadas e tratamentos especializados (ABRELPE, 2023). O RSU possui uma classificação, de acordo com a ABNT (2004), e ela pode ser contabilizada:

- Quanto à origem: domiciliar, comercial, público, de serviço.
- Quanto à periculosidade: perigosos (Classe I), não perigosos (Classe II A) e inertes (Classe II B).
- Quanto à possibilidade de reaproveitamento: recicláveis, orgânicos e rejeitos.

De acordo com sua classificação, o RSU é dividido em três frações principais, o que permite uma categorização e gestão mais eficientes:

- Fração Orgânica: É constituída por restos alimentares e resíduos de jardinagem, representando, tipicamente, a maior parte do RSU.
- Fração Seca Reciclável: Engloba materiais com potencial de reaproveitamento, como papel, papelão e diversos tipos de plásticos.

- Fração de Rejeitos: É composta pelos resíduos que, mesmo após os processos de triagem e separação, não apresentam viabilidade técnica ou econômica para a reciclagem.

A classificação dos RSU deve ser realizada de forma adequada, para que a gestão seja mais eficiente e não acarrete problemas de saúde pública nem de cunho ambiental, reduzindo a quantidade de resíduos em aterros sanitários e trazendo maior aproveitamento em materiais que possuem capacidade de reciclagem (DIAS, 2020).

3.1.2 Obtenção de dados

A discussão sobre a crescente produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e a sua destinação final é um tema cada vez mais relevante e urgente. Globalmente, este é um fator inerente ao crescimento populacional e um claro indicador da evolução humana. Embora o gerenciamento do RSU tenha conquistado espaço significativo nas políticas públicas mundiais, a literatura carece de estudos e análises aprofundadas e consistentes. Faltam dados definitivos e amplamente confiáveis sobre a geração, coleta, reciclagem, armazenamento e disposição final desses resíduos.

O RSU é composto por diversas matérias e fontes de produção, o que resulta em uma mistura heterogênea com uma ampla variedade de características distintas. Ao se realizar uma análise da composição dessa mistura, é considerada a determinação por volume, massa ou densidade de cada material presente. No contexto do RSU, as frações de análise são usualmente expressas em unidade de massa. Esta métrica é preferível por sua facilidade de definição e mensuração, uma vez que o volume pode ser facilmente alterado pela compressão dos materiais, e a densidade varia conforme o volume e exige análises mais complexas. Portanto, a estimativa pela massa é a abordagem mais prática para aplicação e validação (MEYSTRE, 2016).

Os estudos sobre a composição dos resíduos sólidos urbanos frequentemente apresentam resultados conflitantes e não complementares. Isso se deve, principalmente, à falta de padronização metodológica, visto que diferentes regiões e pesquisadores podem adotar métricas e critérios de análise distintos (incluindo ou desconsiderando fatores e delimitando as frações de forma diversa). Além da metodologia, a própria variabilidade na produção de RSU entre regiões é um fator de grande conflito. Essa ausência de uniformidade contribui para o distanciamento da veracidade dos dados apurados. Fatores adicionais, como a longa duração dos estudos, a rotatividade de profissionais, e as mudanças nas metodologias e itens considerados nas contagens de coleta, complicam ainda mais a obtenção de dados precisos (MEYSTRE, 2016).

3.1.3 Caracterização do RSU: composição, origem e fatores de geração

Para o desenvolvimento de políticas públicas de gestão integrada, uma etapa fundamental é a caracterização do RSU, onde se implica a análise sistemática de propriedades, sendo elas físicas, biológicas ou químicas, assim como também a avaliação gravimétrica.

Os resíduos sólidos urbanos apresentam variações significativas em sua composição devido a aspectos socioeconômicos, condições ambientais e hábitos culturais. A composição gravimétrica depende diretamente do comportamento da sociedade. Nos municípios brasileiros, a predominância é de matéria orgânica, correspondendo a aproximadamente 46% do total coletado. Materiais recicláveis vêm em seguida, com 16% de plásticos, 10% de papéis e derivados, 2% de vidros e 2% de metais. O restante é composto por materiais sem potencial de reaproveitamento econômico para reciclagem e rejeitos, segundo a ABRELPE (2023).

Conforme CETESB (2023), o RSU têm sua geração associada ao dia a dia nas atividades urbanas, sendo classificados conforme sua origem:

- Residencial: proveniente de ocupações domésticas diárias, incluindo resíduos orgânicos, embalagens, papéis, plásticos e vidros.
- Comercial e de serviços: advindo de estabelecimentos em geral.
- Públicos: com origem na limpeza urbana de forma total.
- Eventos: obtidos a partir de atividades temporárias.

De acordo com Dias (2020), a geração de resíduos está diretamente ligada a múltiplos fatores, sendo eles o nível socioeconômico (maior geração de resíduos com embalagens), hábitos culturais (práticas de consumo e costumes variando conforme a região), clima (maior geração de resíduo orgânico) e as políticas públicas e infraestrutura (a coleta seletiva e programas de reciclagem), que são fatores que influenciam diretamente na geração e composição geral do resíduo sólido urbano. Portanto, segundo Brasil (2010), municípios que possuem educação ambiental acompanhada de legislações apresentam menores índices de produção de rejeitos, provenientes de programas de incentivo à coleta seletiva e ressignificação dos mesmos.

3.1.4 Tratamento e destinação do RSU no Brasil e em Minas Gerais

A PNRS, constituída pela Lei nº 12.305/2010, é responsável pela gestão do RSU no Brasil. A lei é responsável pelo estabelecimento de princípios, seguidos por objetivos e ferramentas de proteção ambiental, assim como da saúde pública, por meio de atividades

e práticas sustentáveis relacionadas com os resíduos. A hierarquia estabelecida pela PNRS prioriza a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento, seguindo uma fundamentação para a destinação adequada dos resíduos como recurso final (BRASIL, 2010).

3.1.4.1 Desafios e avanços na gestão de resíduos sólidos no Brasil

Contexto Nacional:

Atualmente, o gerenciamento do resíduo sólido urbano no Brasil tem progressos legislativos, mas, apesar desse avanço, ainda se enfrenta obstáculos significativos. Segundo ABRELPE (2023), os dados publicados exibem que 81,8 milhões de toneladas de RSU são produzidos anualmente, e apenas 60,3% disso recebe uma destinação ambientalmente correta, enquanto os outros 39,7% são destinados a locais inadequados, como aterros ou lixões que não têm os requisitos ambientais e técnicos necessários para a destinação.

A predominância no tratamento de resíduos ainda é a disposição final direta em aterros sanitários, que geralmente não implementam métodos de valorização. Alternativas como compostagem, biodigestão e incineração com recuperação energética são incipientes, aplicadas de forma limitada apenas em grandes centros (IBGE, 2008). A taxa de reciclagem é baixa com cerca de 3%, devido à carência de infraestrutura, à ausência de educação ambiental e à ineficiência da logística reversa (CETESB, 2023).

A Tabela 3.1 mostra a comparação dos métodos de destinação do RSU no Brasil e em Minas Gerais.

Tabela 3.1 – Métodos de tratamento e destinação final do RSU no Brasil e em Minas Gerais

Método de destinação	Brasil (%)	Minas Gerais (%)
Aterro sanitário	60,0	62,0
Lixão / disposição inadequada	16,0	10,0
Aterro controlado	24,0	28,0
Coleta seletiva	18,0	20,0
Reciclagem	3,0	4,0
Compostagem	1,0	1,5

Fonte: Adaptado de ABRELPE (2022) e SEMAD (2024).

Gestão de RSU em Minas Gerais

O estado de Minas Gerais se destaca no cenário nacional da gestão de resíduos, apresentando avanços significativos. Segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM, 2022), 73,4% dos municípios utilizam aterros sanitários com regulamentação, sendo um índice superior à média brasileira. O estado possui programas e políticas inovadoras, como o PERS-MG, que é o Plano Estadual de Resíduos Sólidos, e o programa Minas Recicla, ambos estimulando a gestão regionalizada por meio de consórcios intermunicipais e o incentivo à coleta seletiva.

Entretanto, municípios de pequeno porte, especialmente no interior, enfrentam limitações e dificuldades operacionais e financeiras para a implementação de sistemas (SEMAD, 2023). Nesse contexto, os consórcios públicos intermunicipais surgem como uma solução estratégica que permite o compartilhamento de infraestruturas, sendo uma alternativa viável para atender essas localidades de forma conjunta, compartilhando aterros, centrais de triagem e unidades de tratamento (FEAM, 2012).

3.2 RSO: definição, fontes e importância para a geração de energia elétrica

Os Resíduos Sólidos Orgânicos, ou RSO, têm sua base em materiais de origem biológica e, em sua composição, incluem materiais passíveis de decomposição, sendo, de forma geral, biodegradáveis (ABRELPE, 2022), (EMBRAPA, 2020).

3.2.1 Principais fontes geradoras de RSO e potencial energético

Segundo ABRELPE (2022), o RSO é predominante em 46% do resíduo sólido urbano no Brasil. De acordo com (EMBRAPA, 2020), sua fonte se dá por restos alimentícios gerados em domicílios, hotéis, feiras ao ar livre, serviços de jardinagem, restaurantes, mercados, entre outros. Em sua composição, pode haver variação dependendo do consumo em cada residência, do clima da região e dos hábitos culturais (ABRELPE, 2022).

Esses resíduos podem passar por processos que os tornam recursos energéticos ou agrícolas, podendo ser biogás, fertilizante ou insumo com variação na aplicação. O aproveitamento energético advindo do RSO possui grande peso para a sustentabilidade de forma geral, sendo utilizado para fins variados, como, por exemplo, a compostagem, que, além de ajudar a reduzir a quantidade de resíduos, contribui na produção de composto orgânico, ou na produção de biogás, por meio da digestão anaeróbica, que transforma a matéria orgânica em biogás, constituído por uma mistura de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), que reduz a emissão dos gases de efeito estufa e contribui na matriz sustentável por meio da geração de energia térmica e elétrica, (CEMIG, 2025).

3.2.2 Composição da matéria orgânica presente no RSU

A composição do Resíduo Sólido Urbano (RSU) é notavelmente distinta e variável. Essas flutuações dependem de uma série de fatores, incluindo a localização geográfica, o tamanho e tipo de empreendimentos regionais, o índice de desenvolvimento populacional e as características socioeconômicas (RODRIGUES et al., 2023).

Consequentemente, a porcentagem de resíduos orgânicos na fração total do RSU pode variar significativamente entre regiões. Além da quantidade, sua composição molecular

interna também é incerta e mutável, pois a matéria orgânica pode ser oriunda de inúmeras fontes como restos de comida, podas de jardim, entre outras fontes (BRASIL, 2025).

Considerando que o RSU em questão é majoritariamente proveniente de centros urbanos, a principal produção de resíduos orgânicos deriva da vivência humana diária. Nesses ambientes, a composição orgânica é predominantemente constituída por restos de alimentos e pequenas frações de material orgânico diverso. Dessa forma, para a modelagem energética subsequente, o resíduo de alimentos será utilizado como a composição de referência para toda a matéria orgânica presente no RSU.

A Tabela 3.2 apresenta a fração mássica em base seca levantada em relação a análise de restos de alimento, fornecendo uma aproximação considerável para a composição de referência da matéria orgânica do RSU.

Tabela 3.2 – Composição química de resíduos orgânicos

Composto	OLR	Composição química (% , seco)				
		C	H	O	N	S
Resíduos Orgânicos	2	46.9 ± 2.4	6.9 ± 0.4	26.0 ± 2.5	4.2 ± 0.2	0.8 ± 0.1
	4	47.4 ± 2.5	6.8 ± 0.4	25.5 ± 2.1	4.3 ± 0.2	0.8 ± 0.1
	6	48.3 ± 1.4	6.7 ± 0.5	25.0 ± 0.3	4.3 ± 0.3	0.8 ± 0.1
	8	48.3 ± 3.0	6.7 ± 0.5	24.8 ± 1.6	4.3 ± 0.4	0.7 ± 0.1

Fonte: Adaptado de SONG et al., 2021.

Onde OLR (*Organic Loading Rate*) significa Taxa de Carregamento Orgânico, medido em $(kg \cdot VS / (m^3 \cdot d))$, que representa quilogramas de Sólidos Voláteis (VS) por metro cúbico por dia.

Para a realização dos cálculos termodinâmicos e de balanço de massa deste estudo, foi utilizada a seguinte composição percentual em massa seca do resíduo orgânico:

- Carbono (C): 48,3%
- Hidrogênio (H): 6,7%
- Oxigênio (O): 25,0%
- Nitrogênio (N): 4,3%
- Enxofre (S): 0,8%
- Cinzas inertes (Ash): 14,9%

O teor de umidade da fração orgânica dos RSU varia consideravelmente, refletindo flutuações em sua composição e produção. Por se tratar de material orgânico, é esperado um alto percentual de umidade, podendo chegar a porcentagens superiores a 70%. Essa disparidade é confirmada por Dulong (1887), que apresentou em seu estudo de 37% e 48%

para o teor de umidade em diferentes fontes, reforçando a necessidade de estabelecer um valor representativo para fins de cálculo. Assim, para o presente estudo, será adotado o teor de umidade de 40% e 70% para a matéria orgânica presente no RSU, para visualização de sua influencia nos resultados.

3.3 Motivação da escolha dos resíduos orgânicos

Para a utilização do RSU como combustível em usinas termelétricas, é indispensável que o material passe por um processo de combustão. No entanto, o RSU coletado pelos serviços de limpeza urbana e destinado aos aterros sanitários carece de uma triagem eficiente e de uma coleta seletiva robusta. Como os descartes da população frequentemente se misturam, a separação e o tratamento posterior tornam-se excessivamente caros ou até inviáveis (BRASIL, 2025).

A queima indiscriminada de RSU pode liberar gases altamente poluentes, como os resultantes da combustão de polímeros, derivados de petróleo, resinas e componentes químicos diversos. Tal processo exigiria sistemas de purificação de gases de escape mais sofisticados para a adequação às normas ambientais vigentes. Além disso, a presença de materiais não combustíveis, inertes ou tóxicos causaria o acúmulo de resíduos nos equipamentos, exigindo um tratamento posterior específico para esses rejeitos (GOMES, 2018).

Por essas razões, considerou-se a utilização exclusiva da composição orgânica do material presente no RSU. Por ser composta principalmente por carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, sua queima libera gases menos nocivos na atmosfera, embora haja a possibilidade de componentes como enxofre e outros estarem presentes (SONG et al., 2021). Conseqüentemente, a quantidade de resíduos geradas e o tratamento dos gases de saída seria muito mais simples do que no caso da queima da totalidade do RSU.

3.4 Aterros Sanitários

Aterro sanitário é o nome dado ao local de destinação final de resíduos gerados pela população humana. Esses locais são previamente planejados, afastados dos centros urbanos e seguem critérios rigorosos para sua utilização diária. O lixo depositado em seu interior é comprimido camada por camada com o auxílio de tratores. A compressão permite reduzir o volume do material, além de aumentar sua aderência ao solo, evitando que o vento leve os resíduos facilmente. A cada ciclo de alimentação do aterro, toda a superfície utilizada é coberta por uma camada de terra, garantindo a isolamento do material do meio externo e evitando a lixiviação (MARTINS, 2022).

A Figura 3.1 ilustra um aterro sanitário, e é possível identificar na figura a forma de sua construção. Sua base é forrada com material impermeável que impede a passagem

do chorume produzido pela decomposição da matéria orgânica e de outros materiais para o solo. Também é possível ver os canais de captação desse líquido e o duto de saída para os gases gerados.

Figura 3.1 – Aterro sanitário



Fonte: BELTRÃO, 2023.

Aterros sanitários possuem menor impacto ambiental em comparação a lixões. Sua estrutura é feita para suportar grandes volumes de resíduos sólidos e, ao mesmo tempo, dar uma destinação mais segura para os resíduos e gases gerados. O aterro tem em sua construção um sistema de captação que por meio de uma camada porosa construída em sua base permite a locomoção e captação dos resíduos em tubos de coleta.

Os materiais dispostos em aterros sanitários passam por um processo de degradação natural. No entanto, o tempo necessário para essa degradação varia muito. Materiais não naturais, como plásticos, metais e polímeros, possuem um tempo de decomposição extremamente elevado.

Por outro lado, o material orgânico degrada-se muito mais rapidamente. Esse processo ocorre em duas fases. Inicialmente, há uma degradação aeróbia, onde o oxigênio está presente no meio. Posteriormente, ocorre a degradação anaeróbia, que acontece na ausência de oxigênio. A decomposição da matéria orgânica é a principal responsável pela produção do chorume e dos biogases gerados no aterro (SOUZA et al., 2017).

Os gases gerados pela decomposição da matéria orgânica, em maior quantidade o metano, são captados por uma rede de tubos e drenos. Em aterros modernos, esses gases não são apenas queimados e lançados na atmosfera como CO_2 , mas também podem ser aproveitados para geração de energia elétrica ou térmica.

Os lixões, por outro lado, também são locais de disposição final do RSU. No entanto, diferente dos aterros, são locais sem preparo ou planejamento prévio. A disposição dos resíduos no solo é feita sem proteção superficial, e os resíduos de sua decomposição se infiltram no solo sem controle, podendo contaminar o solo e as águas subterrâneas. Sua superfície fica aberta, sem cobertura, permitindo o contato com animais, elementos naturais, contato humano e a propagação de gases e odores.

Lixões são uma das piores escolhas para o descarte de lixo, entretanto, ainda possuem uma porcentagem de utilização muito grande no Brasil. Segundo Carvalho (2024), 31,9% de todos os municípios brasileiros ainda utilizam lixões a céu aberto, sem proteção, para a destinação final do lixo gerado.

A Figura 3.2 ilustra um lixão, evidenciando a completa ausência de organização no armazenamento ou distribuição dos resíduos. Todo o volume de lixo permanece sem cobertura e isolamento, o que facilita o acesso indevido de pessoas e animais. Essa condição representa um risco ambiental e sanitário, podendo gerar acidentes, disseminação de vetores e contaminações graves, como a poluição dos lençóis freáticos devido à infiltração do chorume proveniente da decomposição dos resíduos armazenados.

Figura 3.2 – Lixão a céu aberto



Fonte: Aliança Ambiental, 2025.

A utilização desses resíduos como fonte térmica pode ocorrer de inúmeras formas. No Brasil, várias indústrias cimenteiras já utilizam o coprocessamento como forma de substituição ou complemento do combustível convencional por resíduos. Estima-se que, entre 1990 e 2020, cerca de 20.566 milhões de toneladas de resíduos tenham sido utilizadas para fins de recuperação energética. Em 2022, essa prática substituiu aproximadamente 29% do consumo de coque de petróleo (*petcoke*) nos fornos de clínquer (SCHMITKE, 2023).

O Brasil avança na utilização do RSU como fonte térmica para geração de energia elétrica com a construção da primeira usina *Waste-to-Energy* da América Latina: a URE Barueri (Unidade de Recuperação Energética de Barueri). Localizada em São Paulo, a unidade encontra-se em fase de construção e será responsável por processar, sem tratamento prévio, cerca de 300 mil toneladas de resíduos sólidos por ano. Essa operação absorverá o descarte gerado por 850 mil habitantes, com uma capacidade estimada para suprir o consumo elétrico de aproximadamente 320 mil pessoas (SCHMITKE, 2026)

Mundialmente, cerca de 11% de todo resíduo produzido é destinado a locais que realizam esse tipo de tratamento. Na União Europeia, esse índice alcança 25% dos resíduos produzidos, chegando a 40% nos países nórdicos. O Japão destaca-se como o maior adepto a essa tecnologia, com 70% de destinação, enquanto os Estados Unidos apresentam um

índice de 13%. A aplicação dessas tecnologias limita a utilização de aterros sanitários, minimizando a necessidade de novas áreas de descarte (SCHMITKE, 2023).

3.4.1 Panorama da geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos

A recuperação energética de resíduos sólidos urbanos (RSU) vem sendo progressivamente incorporada como alternativa complementar à disposição final em aterros sanitários, especialmente em regiões com elevada densidade populacional e restrição de áreas disponíveis. Em escala global, é estimado que existam mais de 2.500 plantas de recuperação energética de resíduos, totalizando uma capacidade instalada superior a 70 GW, concentradas principalmente na Europa, Japão, China e Estados Unidos (ISWA, 2021; International Energy Agency, 2023).

Na União Europeia, países como Alemanha, Suécia e Dinamarca utilizam a incineração com recuperação de energia como parte integrante da política de gestão de resíduos, destinando menos de 5% de seus resíduos urbanos a aterros sanitários. Nessas regiões, a geração elétrica a partir de RSU apresenta eficiências globais típicas entre 20% e 30%, podendo alcançar valores superiores quando há cogeração de calor e eletricidade (Confederation of European Waste-to-Energy Plants, 2019).

Em contraste, no contexto brasileiro, a recuperação energética de RSU ainda se encontra em fase inicial de desenvolvimento. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), menos de 1% dos resíduos urbanos coletados no país são destinados a rotas de aproveitamento energético, sendo o aproveitamento de biogás de aterro a principal tecnologia aplicada (Empresa de Pesquisa Energética, 2023). No entanto, análises recentes indicam que o potencial técnico nacional para geração elétrica a partir de RSU pode superar 3 GW, caso sejam implementadas, de forma integrada, tecnologias de conversão térmica e biológica (ABRELPE, 2023).

3.4.2 Vida útil

A vida útil de um aterro sanitário é determinada pelo tempo que leva para atingir sua capacidade máxima de armazenamento, projetado inicialmente para atender uma cidade ou região por um período definido de tempo. Métodos como a estimativa de degradação natural do resíduo, o trabalho em células de deposição e outras técnicas contribuem para prolongar sua vida útil. No entanto, diversos fatores podem acelerar sua diminuição.

Uma das maiores influências na vida útil do aterro é a composição dos resíduos. Mesmo com programas de coleta seletiva e reciclagem, uma quantidade considerável de materiais recicláveis ainda chega aos aterros. Muitos materiais, como os plásticos, possuem uma relação volume/densidade muito alta, mesmo após a compressão. Eles ocupam um

espaço significativo em comparação com outros resíduos. Esse fator, somado ao longo tempo de degradação, prejudica e reduz a vida útil do aterro sanitário (GURJÃO et al., 2020).

Outro fator que influencia na vida útil dos aterros é o aumento populacional, que por sua vez, acarreta um aumento na produção de resíduos para descarte. Conseqüentemente, a carga diária esperada, utilizada para definir a vida útil do aterro, aumenta, e sua vida útil restante diminui. Muitas vezes, para combater essa redução, em vez de construir novos aterros, opta-se pela expansão do volume útil dos existentes. Essa medida, no entanto, aumenta os riscos como danos na manta de impermeabilização e vazamento de poluentes, além de exigir maior controle de estabilidade e segurança do aterro (GURJÃO et al., 2020).

3.4.3 Medidas para evitar a superlotação de aterros

Para mitigar a superlotação de aterros sanitários, algumas medidas podem ser tomadas, entretanto apesar de simples em conceito, demandam estudo aprofundado de logística e funcionalidade. Uma das principais estratégias é a reciclagem. Materiais como plásticos, alumínio, metais e outros materiais são recicláveis, e sua separação dos RSU representa uma redução significativa no volume destinado aos aterros.

Outro material que pode ter seu destino alterado, e que inclusive é o principal componente do RSU, é a matéria orgânica, possuindo uma participação superior de sua composição. Em vez de permanecer por meses em um aterro sanitário, decompondo e ocupando uma vasta área, a matéria orgânica pode ser utilizada como combustível para alimentar caldeiras a vapor e gerar energia elétrica. Dessa forma, seu volume é consumido e transformado em uma fonte de energia, oferecendo uma solução rápida, sustentável e de grande impacto para a vida útil dos aterros sanitários e da cidade de implementação.

3.5 Expectativa de crescimento populacional

Para projetar a geração futura de energia elétrica a partir da matéria orgânica contida no RSU, é essencial estimar o crescimento populacional e, conseqüentemente, a quantidade produzida de resíduos por essa população. Existem diversas fórmulas de previsão populacional, cada uma com diferentes perspectivas de crescimento, como exponencial, linear, de estagnação ou até mesmo de decréscimo (SPERLING, 2014).

Para as estimativas de crescimento populacional e produção de RSU, optou-se por uma formulação que considera o crescimento populacional com taxa crescente. Essa abordagem está descrita pela Equação 1 possuindo duas formulas, onde as variáveis podem ser calculadas pela Equação 2 (SPERLING, 2014, p. 230).

$$P_t = P_0 \cdot e^{K_g \cdot (t-t_0)} \text{ ou } P_t = P_0 \cdot (1+i)^{t-t_0} \quad (1)$$

$$K_g = \frac{\ln P_1 - \ln P_0}{t_1 - T_0} \text{ ou } i = e^{K_g} - 1 \quad (2)$$

Onde P_0 e P_1 são a população inicial e final analisadas respectivamente. P_t é a população estimada no ano t escolhido. t_0 e t_1 são os anos respectivos da coleta da população de P_0 e P_1 . K_g e i são coeficientes a serem determinados. e é o Número de Euler. \ln é a função logarítmica.

3.5.1 Produção de RSU

A massa de resíduo sólido urbano produzido por uma população pode ser calculada utilizando uma base no produto entre a população e a taxa de geração per capita, conforme metodologia apresentada por Monteiro et al. (2001). O cálculo é descrito pela Equação 3.

$$RSU_{total} = População \cdot \dot{m}_{gerado} \quad (3)$$

Onde \dot{m}_{gerado} é a taxa de geração de RSU pela população em kg/hab, considerada constante para os cálculos.

A massa de resíduo sólido orgânico pode ser calculada como a parcela do RSU correspondente ao percentual de resíduos orgânicos, o cálculo é descrito pela Equação 4.

$$RSO = RSU_{total} \cdot \%_{org} \quad (4)$$

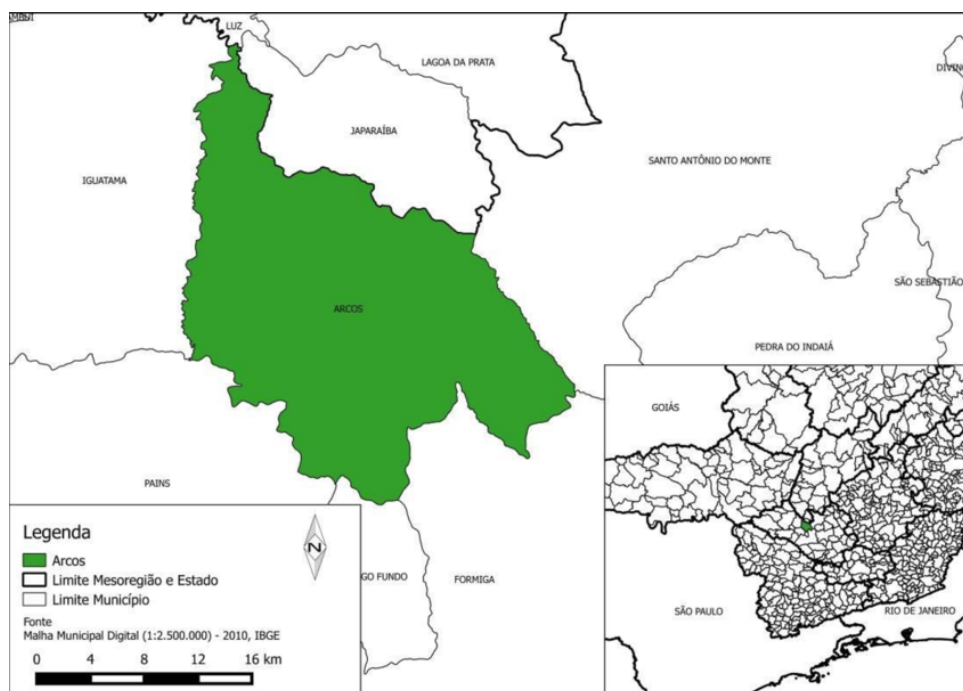
Onde $\%_{org}$ é a porcentagem de material orgânico presente no RSU.

3.6 O Contexto da cidade de Arcos - MG e seu Aterro Sanitário

3.6.1 Cidade de Arcos - MG

O município de Arcos está localizado na Zona do Alto São Francisco, na região Centro-Oeste de Minas Gerais. Sua localização pode ser visualizada na Figura 3.3. Com uma área de 509,87 km², a cidade conta com 41.416 habitantes e 15.057 domicílios, resultando em uma densidade demográfica de 81,23 hab/km² (IAS, 2025).

Figura 3.3 – Cidade de Arcos - MG



Fonte: FARIA; PADOAN, 2015.

3.6.2 Cenário do tratamento e destinação do RSU na cidade de Arcos

O município, de acordo com IAS (2025), apresenta taxa de geração de resíduos sólidos urbanos de 1,06 kg/hab/dia, caracterizando-se acima da média estadual de 0,8 kg e nacional de 1,0 kg. A cidade de Arcos possui coleta seletiva, mas com limitações e uma taxa de recuperação de recicláveis baixa, sendo de 2,97%, um pouco superior às médias estadual e nacional, com 2,6% e 2,4%, respectivamente (IAS, 2025). Além disso, Silva (2022) apresenta segundo dados do parecer de licenciamento do aterro de Arcos de 2018, que o resíduo orgânico representa 66% de toda a massa de RSU produzida na cidade de Arcos.

A coleta e sua gestão são de responsabilidade da prefeitura do município, que realiza o serviço com caminhões compactadores para resíduos secos, úmidos e seletivos, além de equipamentos para a limpeza urbana e contêineres instalados em áreas centrais da cidade, para maior apoio à coleta (Prefeitura Municipal de Arcos, 2022).

3.6.3 Estimativa de consumo elétrico da cidade de Arcos

A estimativa do consumo elétrico de uma região é tipicamente obtida a partir da coleta do gasto energético total, que é, então, dividido pelo número de habitantes ou de unidades consumidoras (residências). Esta análise pode ser ainda subdividida por setores de consumo, tais como industrial, residencial, comercial e público.

Para focar na análise do consumo residencial per capita (por pessoa), é crucial considerar que os valores são tipicamente regionalizados no Brasil. Tais estimativas são significativamente influenciadas pela economia local e pela estrutura socioeconômica da região, fatores que impactam diretamente o consumo médio individual.

De acordo com o Anuário de 2024 EPE (2025a), o consumo médio per capita de eletricidade, considerando todos os setores de consumo para a média, na região Sudeste do Brasil é de aproximadamente 2.803 kWh/hab/ano. Utilizando essa estimativa regional e os dados populacionais de Arcos, projeta-se um consumo diário para a população de cerca de 7,68 kWh/hab/dia, o que totaliza um consumo aproximado de 318 MWh/dia para o município.

A utilização de uma estimativa de consumo regional, conforme os dados do Anuário da EPE, é justificada pela dificuldade em se obter dados elétricos detalhados e segmentados por município e por classe de consumo para estudos preliminares. Embora os valores exatos possam variar, o uso da média da região Sudeste é uma metodologia adequada para este tipo de análise.

O cálculo da demanda energética da cidade é um passo fundamental para, posteriormente, confrontar a energia elétrica gerada pela combustão da fração orgânica do RSU com o consumo atual da cidade de Arcos, permitindo assim quantificar o percentual da demanda energética municipal que pode ser suprida pelo aproveitamento do resíduo sólido.

4 POTENCIAL ENERGÉTICO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO

4.1 Tecnologias para a conversão do RSU orgânico em energia elétrica

A gestão dos resíduos sólidos urbanos de forma adequada é um dos principais obstáculos enfrentados em municípios brasileiros, e esse desafio é pelo crescimento demográfico, consumo elevado e pela insuficiência de sistemas que atuam diretamente no processamento e destinação final desses materiais (Ministério do Meio Ambiente, 2020).

Diante desse cenário, a conversão do resíduo orgânico em energia elétrica se mostra como uma solução viável, sendo uma alternativa sustentável que combina a redução de danos ambientais com a produção de energia elétrica, para mitigar os impactos ambientais, além de auxiliar no cumprimento de metas de descarbonização e economia circular (ABRELPE, 2023). Algumas das tecnologias de conversão de RSU em energia elétrica são:

Processo de incineração

A incineração é um processo de tratamento térmico que promove a queima controlada de resíduos em altas temperaturas, normalmente superiores a 850°C. Durante a combustão, a energia térmica liberada é recuperada e convertida em energia elétrica por meio de turbinas a vapor, caracterizando-se como uma alternativa para geração de energia elétrica a partir de resíduos (CETESB, 2022).

Essa tecnologia é amplamente utilizada em nações como Japão, Alemanha e Suécia, onde há grande limitação de espaços para aterros e regulamentações ambientais rigorosas, que incentivaram sua implementação em larga escala (ISWA, 2021). No Brasil, a aplicação da incineração para fins energéticos ainda se encontra no desenvolvimento, com a criação de sua primeira usina *Waste-to-Energy* a URE Barueri (SCHMITKE, 2026).

Gaseificação

A gaseificação é um processo termoquímico que converte o RSU em gás combustível, denominado de gás de síntese ou (*syngas*), quando exposto a temperaturas elevadas, entre 800°C e 1.200°C, em ambiente com concentração reduzida de oxigênio (Ministério do Meio Ambiente, 2020). O *syngas* é composto principalmente por monóxido de carbono, hidrogênio e metano, apresentando elevada versatilidade de aplicação. Esse gás pode ser utilizado para alimentar motores de combustão interna, turbinas geradoras ou sistemas de células a combustível, possibilitando a geração de energia elétrica a partir dos resíduos processados (CETESB, 2022).

Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia consiste em um processo biológico de decomposição da matéria orgânica por micro-organismos na ausência de oxigênio, resultando na geração de

biogás (principalmente metano e dióxido de carbono) e biofertilizantes (ABRELPE, 2023).

Essa tecnologia tem sido amplamente adotada em países como Alemanha e China, integrando sistemas descentralizados de produção de energia. (FAO, 2021). No Brasil, há um aumento progressivo do interesse na adoção do método, com principais aplicações em setores agroindustriais e aproveitamento energético em aterros controlados (CETESB, 2022).

Pirólise

A pirólise é a degradação térmica da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos em ambiente anaeróbio, operando em temperaturas entre 400°C e 800°C. Essa transformação gera três produtos principais: gases combustíveis, bio-óleos (líquidos pirolíticos) e *biochar*, um resíduo sólido carbonoso (Ministério do Meio Ambiente, 2020).

Os produtos gasosos e líquidos podem ser utilizados na geração de energia elétrica, enquanto o *biochar* pode ser empregado como combustível sólido ou insumo industrial, ampliando as possibilidades de aproveitamento energético dos resíduos tratados (International Solid Waste Association, 2021).

Outras tecnologias emergentes

Dentre as tecnologias avançadas para tratamento de resíduos, destacam-se:

Processamento por plasma térmico: Técnica que utiliza gás ionizado em temperaturas extremas (acima de 3.000 °C) para desagregação molecular completa dos resíduos, convertendo-os em gás de síntese e material vítreo inerte (ISWA, 2021).

Sistemas de células a combustível: Método com alta eficiência termodinâmica, que transforma diretamente biogás e gases residuais em energia elétrica, com mínima geração de subprodutos (ABRELPE, 2023).

Apesar do grande potencial, ambas as tecnologias enfrentam desafios como custos elevados e estágio ainda experimental.

No Brasil, existem usinas que utilizam frações do Resíduo Sólido Urbano (RSU), seus subprodutos ou o próprio resíduo como fonte térmica. Aquelas que utilizam o RSU diretamente não aplicam o método em larga escala, pois a utilização do biogás gerado pela sua decomposição é tecnicamente mais simples. A Tabela 4.1 apresenta as usinas que utilizam o RSU como base para a geração de eletricidade.

Tabela 4.1 – Distribuição de Usinas RSU por UF e Combustível

UF	Tipo de Usina	Combustível Final	Quantidade	Potência (kW)
SP	RSU	Biogás	10	81480
PE	RSU	Biogás	1	28520
RJ	RSU	Biogás	4	24230
BA	RSU	Biogás	1	19730
MG	RSU	Biogás	4	15233,6
RS	RSU	Biogás	3	14744
PR	RSU	Biogás	1	9982
SP	RSU	RSU	2	7800
PB	RSU	Biogás	1	5704
SC	RSU	RSU	1	4680
MG	RSU	RSU	1	4278
AM	RSU	Carvão	1	3000
DF	RSU	RSU	1	2850
MA	RSU	RSU	1	2805
SP	RSU	Carvão	1	2700
MS	RSU	Carvão	1	2550
SC	RSU	Biogás	1	2264
RS	RSU	RSU	2	2000
Total			37	234550,6

Fonte: Adaptado de NEVES; EVARISTO, 2024.

4.2 Análise comparativa das tecnologias: eficiência, custos, impactos ambientais e aplicabilidade

A análise comparativa das tecnologias de conversão de resíduos sólidos urbanos (RSU) em energia elétrica é indispensável para a análise de sua viabilidade sob os pontos de vista técnico, econômico e ambiental (ABRELPE, 2023). Cada rota tecnológica apresenta características distintas quanto à eficiência energética, aos custos de implantação e operação, além dos impactos ambientais associados, que condicionam sua adequação conforme as aplicabilidades em diferentes contextos regionais e socioeconômicos (IPEA, 2021).

A incineração, ou também combustão direta, consiste em uma tecnologia consolidada e amplamente utilizada em diversos países (ISWA, 2021), sendo caracterizada por eficiência energética intermediária, assim como custos de implantação e operação moderados e entre as vantagens da incineração, se destaca a capacidade de redução de até 90% do volume original dos resíduos e a produção constante de energia (ABRELPE, 2023). Seu principal impacto ambiental está relacionado às emissões atmosféricas decorrentes da queima dos resíduos, incluindo óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, material particulado e compostos orgânicos persistentes, como dioxinas e furanos (Ministério do Meio Ambiente, 2020). Diante desses impactos, a implementação dessa tecnologia requer a

adoção de sistemas rigorosos de controle de emissões, de forma a atender às exigências ambientais vigentes (IPEA, 2021). Apesar dessas restrições, a incineração se destaca como uma alternativa eficiente para a redução significativa do volume de resíduos destinados à disposição final (ABRELPE, 2023).

As tecnologias de gaseificação e pirólise operam sob condições controladas de disponibilidade de oxigênio e temperatura, que favorece uma eficiência energética superior quando comparadas à combustão convencional (ISWA, 2021). Esses processos tendem a resultar em menores emissões diretas de poluentes atmosféricos; entretanto, estão associados à geração de subprodutos, como alcatrão, bio-óleo e resíduos sólidos, que demandam tratamento e destinação ambientalmente adequados (FAO, 2021). Além disso, os elevados custos de implantação, aliados à maior complexidade operacional, ainda se configuram como fatores limitantes para sua aplicação em larga escala, especialmente no contexto brasileiro (IPEA, 2021).

A digestão anaeróbica da fração orgânica do RSU se destaca como uma alternativa associada a menores impactos ambientais diretos, uma vez que ocorre em ambiente controlado e sem a ocorrência de processos de combustão (ABRELPE, 2023). Essa tecnologia permite a produção de biogás, utilizado para geração de energia elétrica, além da geração do digestato, que pode ser utilizado como biofertilizante, desde que sejam atendidos os critérios sanitários e ambientais estabelecidos (IPEA, 2021). No entanto, sua eficiência e a viabilidade de aplicação estão fortemente condicionadas à segregação adequada dos resíduos e à eficiência dos sistemas de coleta seletiva, o que ainda representa um desafio em muitas regiões do país (ABRELPE, 2023).

As tecnologias emergentes, como plasma térmico e células a combustível, apresentam potencial para alcançar elevados níveis de eficiência energética, além de contribuir para a redução dos impactos ambientais associados à conversão de resíduos (ISWA, 2021). Entretanto, essas alternativas ainda se encontram em estágio experimental ou de aplicação limitada no Brasil, em razão dos altos custos de implantação, à necessidade de infraestrutura especializada e às incertezas operacionais (Ministério do Meio Ambiente, 2020).

Dessa forma, a escolha da tecnologia mais adequada para a conversão energética de resíduos sólidos urbanos deve se basear em uma análise integrada dos aspectos técnicos, econômicos e ambientais, considerando também as condições locais de geração de resíduos, infraestrutura disponível e exigências legais (IPEA, 2021). Não existe uma solução única que atenda todos os contextos, sendo necessária a avaliação criteriosa das vantagens e limitações de cada tecnologia para garantir sua viabilidade e sustentabilidade no longo prazo (ABRELPE, 2023).

Para a análise do potencial energético da fração orgânica do RSU, a rota da combustão direta (base para o estudo do Ciclo Rankine no Capítulo 5) é adotada. A escolha da rota de conversão por combustão direta, associada a um ciclo de potência a vapor

do tipo Rankine, foi baseada em critérios técnicos alinhados aos objetivos e às delimitações metodológicas deste estudo (THEMELIS, 2010; CHENG; HU, 2019). Considerando que a análise tem como foco a estimativa do potencial energético teórico do resíduo sólido urbano orgânico, a combustão direta permite uma relação mais direta entre o poder calorífico do combustível e a energia elétrica gerada, permitindo a condução de uma avaliação termodinâmica compatível com o escopo adotado (THEMELIS, 2010).

Além disso, essa tecnologia é amplamente consolidada e com larga aplicação em sistemas municipais de gestão de resíduos em diferentes países, o que favorece a utilização de parâmetros médios consolidados (ISWA, 2021; International Energy Agency, 2023). Em comparação, rotas como o aproveitamento de biogás de aterro ou a digestão anaeróbia demandam modelos cinéticos mais complexos, fortemente dependentes de características locais, como tempo de retenção, eficiência de captura de gás e variabilidade temporal da produção, o que extrapola os limites metodológicos deste trabalho (CHENG; HU, 2019; ISWA, 2021).

Destaca-se que a adoção da combustão direta não implica superioridade técnica absoluta em relação às demais rotas de conversão, mas sim sua adequação ao objetivo de realizar uma avaliação preliminar do potencial energético, a partir de dados médios de composição e poder calorífico do resíduo, reconhecendo-se as limitações inerentes à abordagem adotada (THEMELIS, 2010; ISWA, 2021).

Em uma análise comparativa, a rota da combustão é tradicionalmente associada a uma maior emissão de poluentes atmosféricos, como o NO_x e SO_x, se comparada à gaseificação. Entretanto, no escopo deste trabalho, o foco exclusivo na fração mássica orgânica do RSU funciona como um fator mitigador ambiental. A separação prévia desta fração minimiza a entrada de compostos inorgânicos, metais pesados e outros precursores de gases tóxicos no processo de queima. Essa seleção de combustível permite que a rota da combustão seja considerada uma via tecnicamente viável e com impacto ambiental substancialmente reduzido para o estudo de potencial aqui proposto.

Diante do cenário exposto, e considerando que o aproveitamento do biogás gerado pela decomposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em Arcos já foi explorado por Silva (2022) em seu trabalho de conclusão de curso, este estudo optou por investigar a rota de combustão direta para a fração orgânica produzida no município. Embora a combustão apresente desafios em termos de emissões atmosféricas quando comparada à outros métodos, a utilização seletiva da matéria orgânica mitiga tais impactos. Assim, a combustão configura-se como uma rota tecnicamente robusta para a análise do potencial energético aqui pretendida, fundamentada nos princípios do Ciclo Rankine. Dado que o biogás local já foi objeto de estudo anterior, este trabalho concentra esforços na rota térmica, preenchendo uma lacuna na análise de alternativas de valorização energética para os resíduos orgânicos da cidade de Arcos.

5 USINAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A VAPOR

O presente capítulo apresenta conceitos básicos e teóricos para compreensão de usinas a vapor e os ciclos de funcionamento, em específico o ciclo Rankine.

5.1 Usinas a vapor

As usinas a vapor são classificadas conforme o combustível que utilizam para gerar calor e aquecer a água. De acordo com Çengel e Boles (2013, p. 555), essas usinas são geralmente classificadas como usinas a carvão, nucleares ou a gás natural. Embora o tipo de combustível e seu poder calorífico variem, o vapor nessas usinas realiza sempre o mesmo ciclo básico. Dessa forma, os cálculos podem ser realizados da mesma maneira para todos os combustíveis empregados.

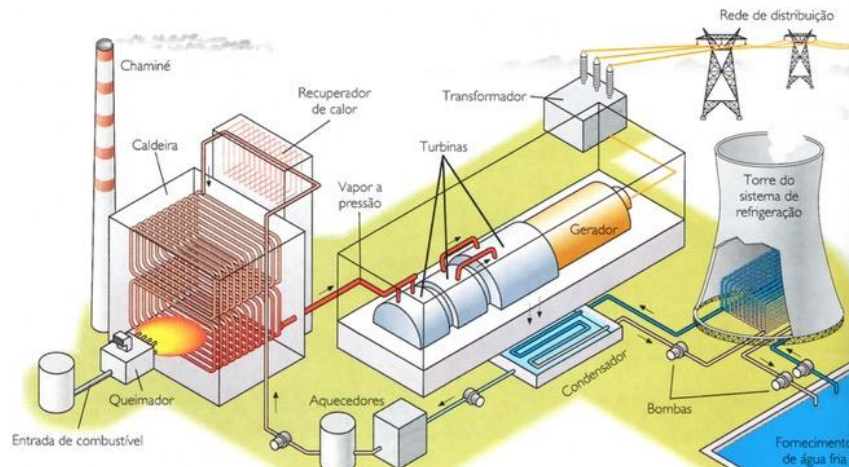
De forma simplificada, uma usina a vapor é uma usina termelétrica composta por quatro equipamentos principais, são eles:

- Bombas hidráulicas: Têm a função de aumentar a pressão do fluido no sistema e gerar o fluxo de movimentação.
- Caldeira: É o equipamento onde a água recebe energia térmica e passa para o estado de vapor superaquecido.
- Turbina a Vapor: Componente que é acionado pelo vapor, gerando energia rotacional e posteriormente energia elétrica.
- Sistema de condensação: Responsável por retirar o calor do vapor e condensá-lo, permitindo que ele inicie novamente o ciclo.

Uma usina termelétrica funciona através da queima de combustível ou absorvendo a energia térmica de outra fonte para aquecer uma série de tubulações com água. O aumento da temperatura transforma a água em vapor, que é então conduzido a uma turbina. A turbina, por sua vez, gera trabalho em forma de rotação, que aciona os geradores elétricos, produzindo energia. Em seguida, o vapor é direcionado a condensadores, que realizam seu resfriamento e condensação, enviando o líquido de volta ao ponto inicial do ciclo.

Um modelo de usina termelétrica com as descrições citadas pode ser visualizado na Figura 5.1. É interessante notar que a ilustração apresenta um esquema mais avançado de geração de energia elétrica, incorporando sistemas de recuperação térmica, turbinas de múltiplos estágios e um sistema de condensação robusto, variações de equipamentos focados no aumento de eficiência do sistema como um todo.

Figura 5.1 – Usina termoeétrica



Fonte: ALVES, 2025.

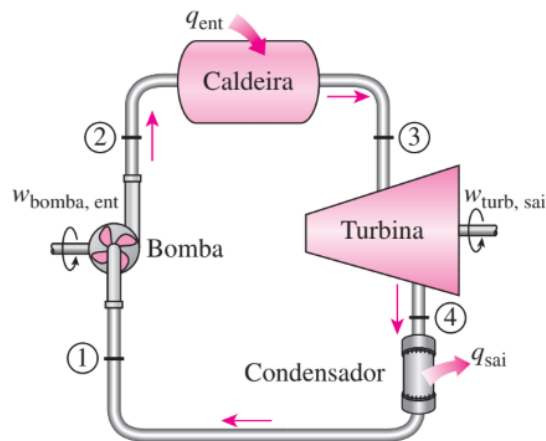
5.2 Ciclo de potência a vapor

A energia elétrica é criada através da transformação e aproveitamento de algum outro tipo de energia primária, existem diversos tipos de usinas elétricas, como, por exemplo as eólicas, hídricas, termelétricas e nucleares. O fato em questão é que em todas elas é necessário aproveitar o trabalho realizado por algum meio ou equipamento para gerar essa energia elétrica. No caso de usinas a vapor, o trabalho utilizado é o trabalho realizado na turbina pelo vapor de água.

Na termodinâmica é possível calcular, como uma estimativa, o trabalho realizado por inúmeros sistemas térmicos, como motores a gás, motores a combustão de líquido, turbinas a vapor, turbinas a gás, entre outros sistemas. O ciclo que mais se adéqua ao realizado em usinas termelétricas é o ciclo Rankine, sendo considerado o ciclo ideal de potência a vapor (ÇENGEL; BOLES, 2013).

O ciclo Rankine trabalha sobre a interação de quatro equipamentos sendo eles, bomba, caldeira, turbina e o condensador. A Figura 5.2 ilustra o ciclo de funcionamento Rankine e a direção e movimentação do vapor.

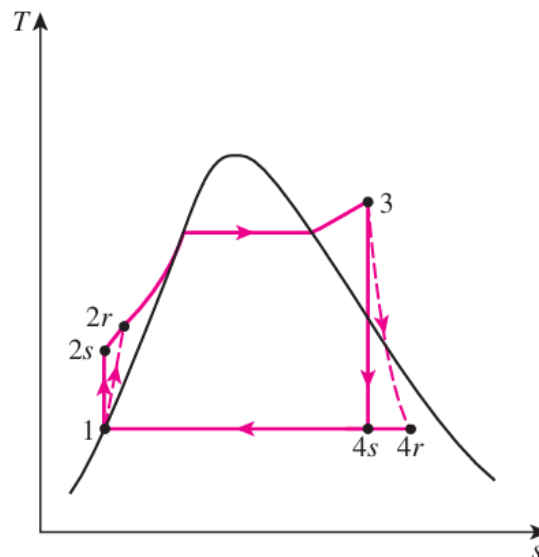
Figura 5.2 – Modelo do Ciclo Rankine



Fonte: ÇENGEL; BOLES, 2013.

O ciclo é calculado levando em consideração o estado da água, e esse estado, tanto energético quanto físico, pode ser ilustrado em diferentes gráficos, mas o mais comum pode ser visto na Figura 5.3. O gráfico mostra o estado da água em cada um dos pontos do ciclo Rankine. A curva marcada com linha em preto é chamada linha de saturação. Qualquer ponto à sua esquerda estará no estado de líquido comprimido; pontos à direita, em vapor superaquecido; pontos abaixo da curva, em uma mistura de líquido e vapor; e pontos sobre a linha, à esquerda, em líquido saturado, e à direita, em vapor saturado.

Figura 5.3 – Gráfico de saturação de um ciclo Rankine



Fonte: ÇENGEL; BOLES, 2013.

Para que um ciclo termodinâmico opere corretamente e sem prejudicar os equipamentos, ele é projetado para trabalhar com condições específicas. Em alguns pontos, certas condições do fluido ou vapor podem influenciar na vida útil e na eficiência dos equipamentos. Algumas limitações e propriedades importantes nesses pontos são:

- Ponto 1: Vapor na bomba hidráulica pode causar cavitação, então é necessário que a bomba opere somente com líquido.
- Ponto 3: Água na turbina pode causar cavitação e desgaste nas pás da turbina, por isso que na entrada da turbina o recomendado é que o vapor esteja em estado superaquecido, para que ele não se condense na turbina, podendo ser condensado após a turbina ou preferencialmente no condensador (do ponto 4 ao ponto 1).

Todos os quatro componentes do ciclo Rankine operam em regime permanente, já que trabalha em um ciclo contínuo. As variações de energia cinética e potencial do vapor e do líquido são desprezíveis se comparadas às variações de trabalho e à transferência de calor, portanto, podem ser desconsideradas. Sendo assim, a equação de energia aplicada a um equipamento em regime permanente por unidade de massa é ditada pela Equação 5, representando a primeira lei da termodinâmica aplicada em um volume de controle em regime permanente (ÇENGEL; BOLES, 2013).

$$(q_{ent} - q_{sai}) + (w_{ent} - w_{sai}) = h_{sai} - h_{ent} \quad (5)$$

Onde q é o calor, w é o trabalho e h é a entalpia. Os subscritos (ent) e (sai) significam, respectivamente, "que entra" e "que sai", todas as unidades de medidas em kJ/kg.

5.3 Energia da combustão

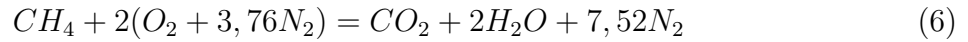
Um combustível é qualquer material que pode ser queimado para liberar energia térmica. A maioria dos combustíveis é composta principalmente de carbono e hidrogênio, por isso, são denominados hidrocarbonetos. A combustão é o processo químico no qual o combustível é oxidado, liberando uma grande quantidade de energia. Devido à sua grande abundância, o ar é o oxidante mais comum para processos de combustão.

A queima completa de um combustível ocorre quando todos os seus materiais combustíveis são oxidados. Na maioria dos casos, a queima é considerada completa quando todo o carbono se transforma em CO_2 e todo o hidrogênio se transforma em H_2O (ÇENGEL; BOLES, 2013).

O cálculo do calor liberado por um combustível é normalmente realizado por meio de um balanço de massa e energia. Nesse processo, as entalpias dos reagentes e produtos são analisadas para estimar a quantidade de calor liberada. Essa estimativa pode ser feita de forma analítica ou por meio de *softwares* especializados. Essa análise é considerada confiável, especialmente quando aplicada a combustíveis com composições e comportamentos de combustão bem conhecidos.

O cálculo do calor liberado por um combustível é geralmente realizado por meio de um balanço de combustão, no qual as entalpias dos reagentes e produtos são analisadas.

Uma aproximação da quantidade de calor liberada é, então, estimada de forma analítica ou automatizada por *softwares*. Um exemplo da combustão de balanço de massa do metano pode ser visto na Equação 6 (ÇENGEL; BOLES, 2013, p. 773).



No entanto, em uma queima real, é crucial garantir a combustão completa de todo o combustível. Para evitar que parte do material não seja queimada, resultando na emissão de gases combustíveis não aproveitados, adiciona-se uma quantidade superior de ar, aumentando as probabilidades de uma combustão eficiente e garantir toda a queima do combustível. Além de ser uma exigência das normas ambientais, de obter O_2 livre no processo de combustão. Esta técnica é conhecida como queima com excesso de ar. A proporção de ar excedente pode variar significativamente dependendo do combustível, das condições operacionais e das necessidades específicas, pois a adição excessiva de ar, embora promova a combustão completa prejudica a temperatura máxima alcançada e calor liberado pela queima. Isso ocorre porque, junto com o oxigênio, uma grande quantidade de nitrogênio é inserida, que não contribui para a combustão.

5.3.1 Calor liberado

A determinação da temperatura máxima da chama, também conhecida como temperatura adiabática de chama, constitui um parâmetro crucial no dimensionamento de sistemas de combustão. Embora represente um valor teórico (por desconsiderar perdas energéticas), essa grandeza é fundamental para estabelecer as especificações mínimas de resistência térmica dos materiais da estrutura do queimador ou incinerador, essa temperatura pode ser calculada pela Equação 7 (ÇENGEL; BOLES, 2013, p. 788). Essa equação resulta de um balanço de energia no qual a entalpia total dos reagentes é igualada à entalpia total dos produtos da combustão.

$$\sum N_p(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p = \sum N_r(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r \quad (7)$$

Onde: $\sum N_p$ e $\sum N_r$ são respectivamente a somatória do número de mols dos produtos e reagentes. \bar{h}_f° , \bar{h} , \bar{h}° são respectivamente a entalpia de formação, entalpia na temperatura a ser encontrada (nos produtos) e entalpia na temperatura de referência.

Os valores das entalpias para a maioria dos componentes podem ser encontrados em tabelas termodinâmicas, o que possibilita o cálculo da combustão de diversos hidrocarbonetos. No entanto, para o presente estudo, foram utilizados os coeficientes de cálculo termodinâmico NASA Glenn, que consistem em equações que utilizam dados de uma tabela produzida para mais de 2.000 sólidos, líquidos e gases, em uma faixa de temperatura entre 200 K e 20.000 K (MCBRIDE et al., 2002).

Estabelecida a temperatura de chama, o calor liberado pela combustão (Q_{sai}) pode ser determinado. Este cálculo, apresentado na Equação 8 (que deriva da Equação 7), se difere da abordagem adiabática por incorporar as perdas térmicas do processo.

$$Q_{sai} = \sum N_r(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r - \sum N_p(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p \quad (8)$$

O calor liberado na queima do combustível (Q_{sai}) é o valor fundamental utilizado como fonte de energia térmica no ciclo Rankine. A quantificação de Q_{sai} é determinada pelo balanço das entalpias entre os reagentes na entrada e os produtos de combustão na saída. Contudo, para garantir a precisão do resultado deste cálculo, é imprescindível uma estimativa prévia da temperatura dos gases de exaustão. Em cenários de estudo onde a medição direta desta temperatura não é possível, mas o cálculo se faz necessário, a definição da temperatura adiabática de chama estabelece um limite máximo teórico para essa estimativa.

É crucial salientar que a temperatura real de saída desses gases é significativamente inferior à temperatura adiabática. Essa redução ocorre porque processos como a dissociação e a associação de átomos durante a combustão absorvem calor para serem realizados, diminuindo consideravelmente a temperatura final. Como exemplo, em uma análise ao trabalho de Salomão (2021) sobre a combustão de gás GLP, foi registrada uma temperatura adiabática de 2.264,65 K, contrastando com uma temperatura média de saída dos gases medida em 575 K. Este dado demonstra que a temperatura real de exaustão neste caso atingiu aproximadamente 25,4% da temperatura máxima teórica da chama adiabática.

5.3.2 Poder calorífico superior e inferior

A maioria dos combustíveis possui hidrogênio em sua composição. Durante o processo de queima, há a geração de água. Segundo Çengel e Boles (2013, p.79) dependendo do estado de saída (líquido ou gasoso), o poder calorífico do combustível pode ser denominado inferior (PCI), se a água sair em estado gasoso, e superior (PCS), se sair no estado líquido. A diferença está na energia necessária para a evaporação da água. Quando ela sai no estado líquido (PCS), o calor de vaporização é aproveitado e incluído no poder calorífico. Quando ela é liberada no estado gasoso (PCI), essa energia não é contabilizada. Em cálculos termodinâmicos, é comum utilizar os valores de PCI para análise de combustões, pois, no contexto real, toda a água produzida é liberada no estado de vapor (ÇENGEL; BOLES, 2013). O poder calorífico inferior pode ser encontrado através da Equação 9.

$$PCI = PCS - (m \cdot h_{lv})_{H_2O} \quad (9)$$

Onde PCS e PCI são, respectivamente, o poder calorífico superior e inferior em kJ/kg de combustível. O termo $(m \cdot h_{lv})_{H_2O}$ é a energia referente à condensação da água,

sendo m a massa de água produzida por unidade de massa de combustível e h_{lv} a entalpia de vaporização da água.

5.3.2.1 Limitação de parâmetros de checagem

Conforme mencionado na Seção 3.1.2, a quantidade de estudos sobre a composição da fração orgânica presente no RSU é limitada, sendo ainda menor o número de trabalhos que abordam esse material como fonte térmica. Geralmente, as pesquisas existentes focam na análise do Poder Calorífico Superior (PCS) baseando-se em formulações empíricas e considerando o material apenas em base seca, sem analisar o Poder Calorífico Inferior (PCI) ou a influência da composição dos gases de exaustão.

Segundo análises apresentadas por Made (2023), que realizou a variação da composição da matéria orgânica em 24 diferentes proporções, a média do Poder Calorífico Superior (PCS) foi de aproximadamente 15,41 MJ/kg de material orgânico. Sob uma perspectiva metodológica distinta, Sailer et al. (2021) alcançou valores semelhantes por meio de análise física em bomba calorimétrica, obtendo uma média de 15,417 MJ/kg para o composto orgânico. Ambos os trabalhos são focados na análise do PCS em base seca do material, sem considerar a umidade e o cálculo do PCI da combustão.

O presente estudo, por sua vez, realizou a análise do potencial térmico da combustão do resíduo sólido orgânico considerando o balanço de entalpias dos reagentes e produtos durante uma combustão direta. A metodologia leva em conta fatores críticos como a umidade e o excesso de oxigênio durante o processo.

Dado o exposto, nota-se a escassez de material disponível que permita a comparação direta dos valores encontrados por meio desta análise específica. Entretanto, é possível validar se os valores de PCS obtidos pela formulação proposta se adéquam aos resultados de modelos empíricos de outros estudos. Para essa validação, será utilizada a formulação para o cálculo do PCS da fração orgânica do RSU apresentada por (YOUNG, 2010), conforme demonstrado na Equação 10.

$$PCS = (34.91 \times C) + (117.83 \times H) - (10.34 \times O) - (1.51 \times N) + (10.05 \times S) - (2.11 \times Ash) \quad (10)$$

Ao aplicar os valores da composição do resíduo orgânico em base seca (apresentados na seção 3.2.2) na formulação empírica apresentada na Equação 10, o Poder Calorífico Superior (PCS) encontrado é de 21,8 MJ/kg de resíduo. Em contraste, a análise que utiliza o balanço de entalpias (detalhado na seção 5.3.1), considerando a mesma composição e avaliando a variação das entalpias de formação dos produtos e reagentes, resulta em um PCS de 23,8 MJ/kg de resíduo. Essa diferença de 2 MJ/kg é atribuída à natureza distinta dos métodos de cálculo (fórmula empírica versus balanço termodinâmico) podendo ser considerada uma aproximação válida diante da disparidade das análises.

Contudo, esta comparação apenas torna mais plausível a funcionalidade do código criado, pois o fator efetivamente utilizado no estudo é o PCI do resíduo, o qual não pode ser validado com base na literatura disponível.

5.4 Eficiência do Ciclo Rankine

Embora a reversibilidade e a ausência de perdas sejam a base do ciclo de Carnot, na prática, a perda de energia é inevitável em qualquer ciclo termodinâmico real. Fatores como atrito em componentes mecânicos (bombas e turbinas), condução de calor através das paredes dos equipamentos e ineficiências na transmissão de energia contribuem para que a eficiência real de um ciclo Rankine seja sempre menor que o ciclo ideal.

No entanto, essas perdas já são incorporadas nas fórmulas e análises de potência do Ciclo Rankine. As Equações 11, 12 e 13 apresentam as eficiências que são cruciais para a análise do ciclo Rankine, são elas respectivamente a eficiência térmica do ciclo (η_t), a eficiência isentrópica da turbina (η_T), e a eficiência isentrópica da bomba (η_B).

$$\eta_t = \frac{W_{liq}}{q_{ent}} = \frac{(h_3 - h_{4r}) - (h_{2r} - h_1)}{h_3 - h_{2r}} \quad (11)$$

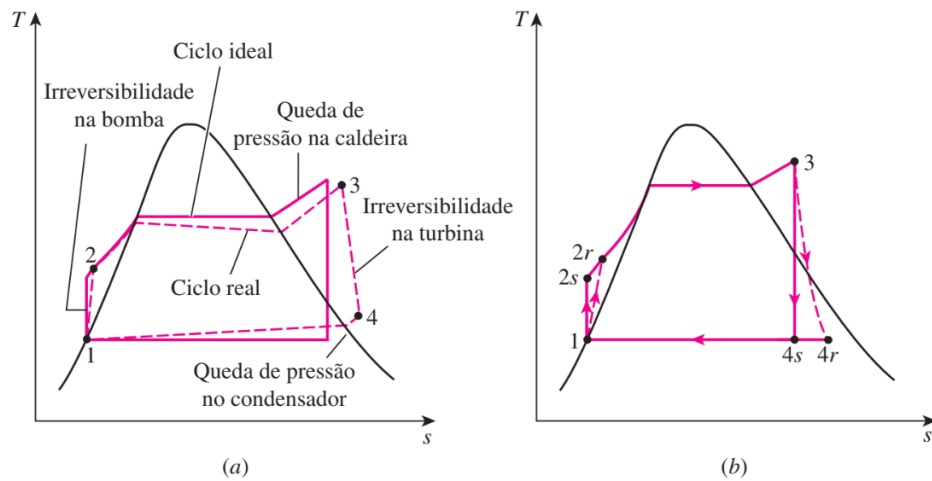
$$\eta_T = \frac{W_s}{W_r} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2r} - h_1} \quad (12)$$

$$\eta_B = \frac{W_r}{W_s} = \frac{h_3 - h_{4r}}{h_3 - h_{4s}} \quad (13)$$

Onde W_{liq} é o trabalho líquido, q_{ent} é o calor que entra em $[kJ/kg]$, W é o trabalho em $[kJ/kg]$, h é a entalpia em $[kJ/kg]$. Os subscritos s e r significam respectivamente isentrópico e real, os subscritos numerados se referem aos pontos do ciclo.

Assim como em outros ciclos termodinâmicos, o cálculo do ciclo Rankine real é inerentemente complexo e passa por remodelagens para permitir a realização dos cálculos. A Figura 5.4 ilustra, no lado (a), a comparação entre o ciclo Rankine ideal e o ciclo Rankine real. No ciclo real, inúmeras perdas ocorrem ao longo de todo o equipamento, como o atrito do fluido e a perda de calor para o ambiente, as quais modificam significativamente o diagrama de estado do ciclo. Já no lado (b) da mesma Figura, é apresentado um formato simplificado do ciclo, que desconsidera as perdas de menor influência nos valores finais, concentrando-se nas irreversibilidades que ocorrem na turbina e na bomba.

Figura 5.4 – Variação do Ciclo Rankine



Fonte: ÇENGEL; BOLES, 2013.

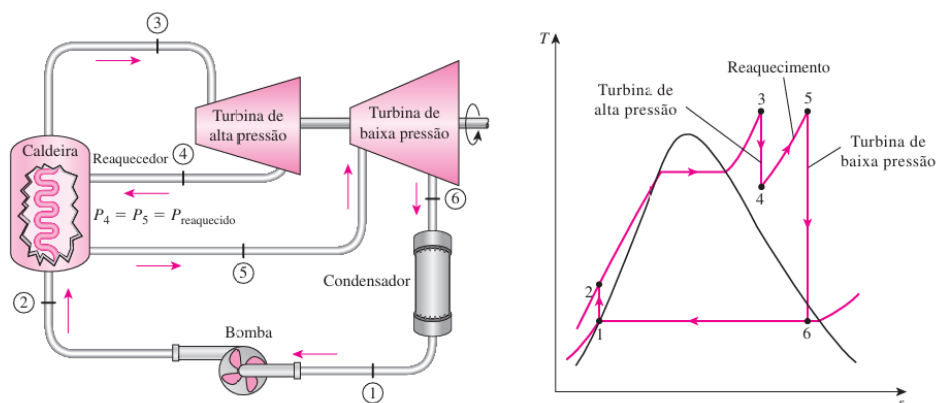
5.4.1 Ciclo de análise

É fundamental reconhecer que, no contexto da termodinâmica de sistemas a vapor, existem configurações mais avançadas que buscam maximizar a eficiência do ciclo Rankine. Os principais exemplos dessas otimizações são os ciclos com reaquecimento e os ciclos com regeneração (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Ambos os aprimoramentos têm como princípio fundamental o aproveitamento máximo do calor dentro do sistema:

- No ciclo com reaquecimento, o vapor é parcialmente expandido na turbina de alta pressão e, em seguida, reenviado à caldeira para ser reaquecido antes de se expandir novamente na turbina de baixa pressão, o ciclo com reaquecimento pode ser visto na Figura 5.5.

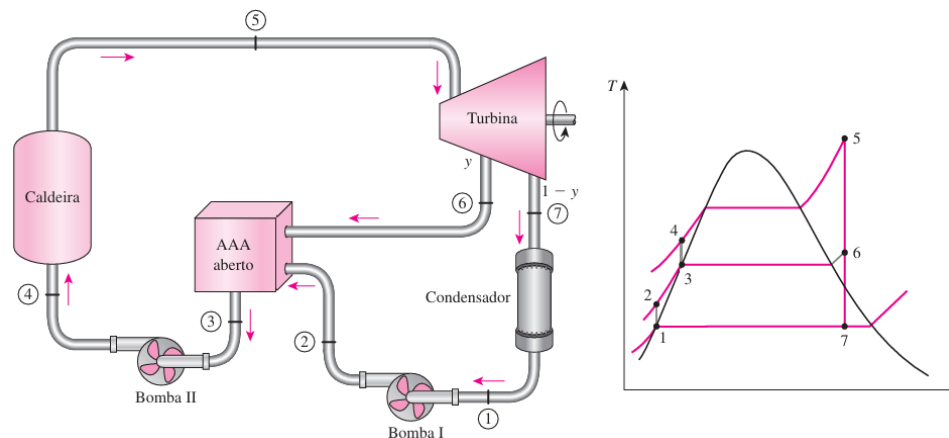
Figura 5.5 – Ciclo Rankine com reaquecimento



Fonte: ÇENGEL; BOLES, 2013.

- O ciclo com regeneração utiliza o vapor extraído da turbina para pré-aquecer a água de alimentação antes que ela chegue à caldeira. Esse processo reduz a necessidade de calor externo e minimiza o calor descartado para o condensador, o ciclo com regeneração pode ser visto na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Ciclo Rankine com regeneração



Fonte: ÇENGEL; BOLES, 2013.

É importante notar que os ciclos combinados, que integram as técnicas de reaquecimento e regeneração, resultam em eficiências termodinâmicas ainda maiores.

Apesar da superioridade termodinâmica das configurações otimizadas, este estudo utiliza o ciclo Rankine básico real como referência para a análise da produção de energia elétrica. Essa escolha se justifica pela viabilidade prática e pelas razões de engenharia, já que o ciclo básico é a configuração mais simples de ser instalada e administrada. Essa simplicidade facilita a operação e a manutenção, tornando-o o ponto de partida ideal para uma instalação real, mesmo que apresente a menor eficiência térmica em comparação com suas variações mais complexas.

5.5 Eficiências a serem utilizadas

A turbina é o equipamento que converte o trabalho exercido pelo vapor em trabalho de eixo, o qual é então transferido para um gerador elétrico para a produção de energia elétrica. Ao se referir à eficiência da turbina, é fundamental compreender que não se trata da eficiência da geração de energia elétrica total, mas sim da capacidade da turbina de extrair a energia do vapor. A eficiência da produção de eletricidade, por sua vez, é determinada pela eficiência do próprio gerador elétrico (U.S. Environmental Protection Agency, 2015).

Çengel e Boles (2013, p. 369) ressaltam que turbinas de grande porte e com projeto otimizado podem atingir eficiências superiores a 90%, ao passo que turbinas de menor porte geralmente operam abaixo de 70% de eficiência isentrópica. É importante notar que

o valor real da eficiência só pode ser determinado com precisão por meio de leituras nos pontos de entrada e saída da turbina. Esses valores permitem a análise do estado do ponto que são posteriormente aplicados na Equação 1.3.

Assim como as turbinas, as caldeiras/incineradores apresentam diversas funções e configurações distintas. Para este projeto, o modelo escolhido para coleta de dados é a caldeira aquatubular com um exemplo mostrado na Figura 5.7, que se caracteriza por conter a água dentro de tubulações, permitindo que a troca de calor seja realizada pelos gases de combustão em alta temperatura que circulam ao redor dessas tubulações.

Figura 5.7 – Caldeira do tipo aquatubular



Fonte: GAMBHEE, 2025.

Este equipamento utiliza a energia térmica dos gases provenientes da combustão do combustível, que pode ocorrer em uma zona lateral, direcionando-os para o aquecimento e geração de vapor superaquecido para acionar a turbina. Por ser o modelo mais adequado para a utilização de material sólido como combustível, sua escolha é justificada. Conforme Faria (2021), a eficiência térmica de uma caldeira aquatubular varia entre 80% e 85%, o que representa a capacidade de aproveitamento da energia liberada pela queima do combustível para a produção de vapor.

Existem diversos tipos de bombas hidráulicas, cada uma projetada para aplicações específicas. Entre elas, as bombas centrífugas são as mais comuns. De acordo com Evans (2012) a eficiência dessas bombas varia significativamente com o tamanho, modelos de médio e grande porte geralmente operam com eficiências entre 75% e 93%, enquanto bombas menores apresentam eficiências na faixa de 50% a 70% de eficiência isentrópica.

O último componente a ser considerado nos cálculos de eficiência é o gerador de eletricidade. Este equipamento converte energia mecânica, geralmente rotacional, em energia elétrica por meio de indução eletromagnética. A eficiência de tais geradores é tipicamente elevada, com pouca influência nos resultados esperados. Conforme EURELECTRIC e VGB (2003), ao considerar todo o processo de geração desde a entrada do trabalho de eixo no gerador até a saída de energia à rede elétrica o gerador possui eficiência de 90%, entretanto geradores com tecnologias atuais possuem eficiências superiores podendo chegar

a 98% de eficiência (EPE, 2019)

Com base nos levantamentos de eficiências de equipamentos realizadas, uma escolha de valor para cada um dos equipamentos foi realizada, a Tabela 5.1 mostra a eficiência escolhida de cada um dos equipamentos citados anteriormente.

Tabela 5.1 – Eficiência dos componentes para os cálculos

Equipamento	Eficiência
Bomba Centrífuga	70%
Caldeira/Incinerador	85%
Turbina a vapor	60%
Gerador	98%

Fonte: Próprios autores, 2025.

Usinas termelétricas, por sua própria natureza, dependem da geração de vapor para produzir energia elétrica. Para isso, elas precisam de uma fonte térmica que aqueça a água até transformá-la em vapor. Como já citado, em diversas indústrias essa fonte térmica pode ser bastante variada e flexível.

Nesse contexto, a queima da matéria orgânica presente nos RSU surge como uma opção valiosa. Ela gera uma quantidade significativa de calor que pode ser diretamente aproveitada para o aquecimento da água. Dessa forma, o RSU se transforma em um combustível estratégico para a geração de eletricidade, oferecendo uma solução dupla, onde promove o descarte adequado de resíduos e contribui para a produção energética.

5.6 Pressão e temperatura de trabalho

O ciclo Rankine de potência opera com água como fluido de trabalho, que percorre uma série de estados termodinâmicos, incluindo líquido comprimido, líquido saturado, mistura líquido-vapor, vapor saturado e vapor superaquecido. A análise termodinâmica desse ciclo é realizada em um diagrama que utiliza duas linhas de pressão constante (isobáricas), que representam, respectivamente, as pressões de operação da caldeira e do condensador.

A escolha da pressão e temperatura de trabalho impacta diretamente o comportamento e a eficiência do ciclo. Embora a otimização da eficiência não seja o foco deste trabalho, a seleção de parâmetros operacionais realistas é crucial para que a análise de potencial seja consistente com as condições e limitações reais.

5.6.1 Turbinas a vapor

De acordo com o catálogo de turbinas de pequeno porte da Siemens Energy (2025), a pressão de entrada pode variar de 30 a 139 bar e a temperatura de 415 a 550°C. Esses dados se referem a turbinas de pequena potência. Turbinas de maior potência, no entanto, podem operar com pressões e temperaturas superiores, e a variação em sua estrutura, modelo e material também influencia esses valores.

5.6.2 Incineradores com recuperação de calor

Em processos de geração de energia elétrica derivada dos resíduos, a combustão não é realizada em caldeiras convencionais. Em casos como esses, é utilizado um incinerador, onde a queima é realizada de forma controlada em câmaras operando em altas temperaturas. Na combustão, os gases provenientes são conduzidos para um trocador de calor, ou também conhecido como gerador de vapor por recuperação de calor. O processo se baseia na utilização da energia térmica para aquecimento de água, gerando o vapor utilizado no ciclo Rankine (EPA, 2021).

(GIANOTTI; SILVA, 2020) e (SILVA; PEREIRA, 2020) destacam que a temperatura de operação de incineradores modernos são de 850°C e 1.100°C na zona primária de combustão, garantindo a oxidação completa da matéria orgânica. Após a queima, os gases seguem para o gerador de vapor por recuperação de calor, onde trocadores aquatubulares permitem a formação de vapor saturado ou superaquecido, substituindo a função que seria feita pela caldeira convencional do ciclo Rankine. Por exemplo, o modelo de caldeira aquatubular da Vikon (2025) pode produzir vapor com pressões de até 90 bar e temperaturas de até 520°C, operando com vapor saturado ou superaquecido.

5.6.3 Condensador

O condensador, que condensa o vapor após a turbina, exerce grande influência no ciclo Rankine. Ele geralmente opera a pressões inferiores à pressão atmosférica para aumentar a eficiência do ciclo. No entanto, essa operação tem restrições e riscos.

A pressão mínima no condensador não pode ser menor que a pressão de saturação correspondente à temperatura do meio de refrigeração. Por exemplo, considerando a temperatura do ambiente como 25 °C, a pressão no condensador deve ser no mínimo maior que a pressão de saturação a 35 °C (sendo para esse caso uma pressão de 5,67 kPa), permitindo uma diferença de no mínimo 10°C para uma troca de calor eficaz (ÇENGEL; BOLES, 2013, p. 563-564). Operações em baixas pressões exigem condensadores de alta eficiência para permitir baixos valores de pressão.

O principal risco de se operar abaixo da pressão atmosférica é a entrada de ar no condensador. A baixa pressão também aumenta a umidade na saída da turbina, podendo

causar cavitação nas pás, gerando desgaste precoce (ÇENGEL; BOLES, 2013, p. 564).

5.7 Cálculos termodinâmicos

Inicialmente, para a determinação do potencial energético do resíduo orgânico presente no RSU, é fundamental definir a limitação principal do sistema, a quantidade de combustível disponível. A vazão mássica de resíduo orgânico (\dot{m}_{RSO}) constitui um fator absoluto nos cálculos, uma vez que é uma variável dependente da produção municipal e do crescimento populacional. Essa vazão mássica limita a quantidade de calor que pode ser fornecida, estabelecendo um teto máximo para a potência elétrica gerada.

A metodologia aplicada neste estudo é a análise de desempenho no uso do combustível, com foco na potência líquida máxima gerada pelo ciclo Rankine. Nessa abordagem, o fator limitante de desempenho é o calor máximo liberado pela combustão da matéria orgânica presente nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). O Poder Calorífico Inferior (PCI) é o parâmetro fundamental dessa análise, pois representa a quantidade de calor liberada por unidade de massa do combustível.

Esta metodologia difere da análise de projeto comum, onde se define uma potência elétrica de saída desejada (a ser gerada pela turbina) para, então, calcular a vazão mássica de combustível necessária. Uma vez que o objetivo central deste trabalho é estimar o potencial máximo de geração de energia com base em um recurso finito e disponível (o RSU de Arcos/MG), a abordagem correta é calcular a potência de saída a partir da potência térmica de entrada fornecida pelo combustível.

O cálculo do Ciclo Rankine em si, que envolve a determinação das entalpias nos pontos notáveis (caldeira, turbina, condensador e bomba), é realizado em função dos parâmetros de operação (temperatura e pressão) e define o trabalho líquido específico (W_L) disponível calculado em (kJ/kg). No entanto, o cálculo da potência elétrica final (P_{ele}) é um valor diretamente condicionado pelo calor efetivamente absorvido pela caldeira, proveniente do combustível (Q_{disp}).

A taxa de calor disponível para ser absorvida pela caldeira (\dot{Q}_{disp}) é advinda da taxa de calor liberado pela combustão da massa orgânica do RSU (\dot{Q}_{comb}). Seus cálculos são demonstrados nas Equações 14 e 15.

$$\dot{Q}_{disp} = \dot{Q}_{comb} \cdot \eta_c \quad (14)$$

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{m}_{comb} \cdot PCI_{comb} \quad (15)$$

Onde \dot{Q}_{comb} é a potência térmica liberada pela combustão da matéria orgânica em (kW), \dot{m}_{comb} é a vazão mássica de combustível em (kg/s), PCI_{comb} é o poder calorífico inferior do combustível em (kJ/kg), \dot{Q}_{disp} é a potência térmica efetivamente disponível para absorção pela caldeira em (kW) e η_c é a eficiência da caldeira.

O calor disponível \dot{Q}_{disp} é o responsável por limitar a vazão mássica de vapor (\dot{m}_{vap}) que pode ser gerada na caldeira, pois é a energia de aquecimento responsável por transformar a água em vapor, dentro dos parâmetros calculados no ciclo Rankine. A vazão mássica de vapor do sistema pode ser calculada utilizando a Equação 16.

$$\dot{m}_{vap} = \frac{\dot{Q}_{disp}}{Q_{in}} = \frac{\dot{Q}_{disp}}{h_3 - h_2} \quad (16)$$

Onde \dot{m}_{vap} é a vazão mássica de vapor gerada em (kg/s), e Q_{in} é o calor específico na caldeira de acordo com o ciclo Rankine em (kJ/kg).

Para definir a potência elétrica que o ciclo Rankine consegue produzir é necessário calcular a taxa de trabalho líquido produzido pelo ciclo (\dot{W}_L). Esses valores são calculados pelas Equações 17 e 18.

$$P_{ele} = \dot{W}_L \cdot \eta_g \quad (17)$$

$$\dot{W}_L = \dot{m}_{vap} \cdot (W_T - W_B) = \dot{m}_{vap} \cdot ((h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)) \quad (18)$$

Onde P_{ele} é a potência elétrica produzida em (kW), \dot{W}_L é a potência líquida (taxa de trabalho líquido) do ciclo em (kW), η_g é a eficiência do gerador, \dot{m}_{vap} é a vazão mássica da vapor dentro do ciclo em (kg/s), e W_T e W_B são respectivamente o trabalho específico da turbina e o trabalho específico da bomba em (kJ/kg).

Para calcular a energia elétrica produzida (kWh), é necessário multiplicar a potência elétrica (kW) gerada pelo ciclo pelo número de horas de operação (tempo de trabalho), conforme ilustra a Equação 19.

$$E_{Prod} = P_{ele} \cdot H_{trabalho} \quad (19)$$

Onde E_{Prod} é a eletricidade produzida em (kWh) e $H_{trabalho}$ é o tempo de funcionamento do equipamento em horas.

5.7.1 Estimativa de eletricidade gerada

Como método de comparação, é possível estimar de forma teórica a energia elétrica gerada por massa de combustível utilizando o poder calorífico como base. Conforme demonstrado pelas análises teóricas e analíticas levantadas por Made (2023), e fundamentando-se nos dados gerados neste trabalho, foi possível realizar uma estimativa preliminar da geração de energia em relação à quantidade de calor liberado pela combustão. Por exemplo, no modelo empírico, para um PCS de 15390 kJ/kg, a energia gerada seria de aproximadamente 0,78 kWh/kg de resíduo sólido orgânico, mantendo uma média de 0,05 MWh/kg para cada MJ/kg de PCS em todas as demais análises realizadas, sejam elas empíricas ou práticas, os resultados do trabalho analisado pode ser visto na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Potencial energético e energia elétrica bruta gerada por diferentes abordagens

Abordagem	Potencial de energia (kJ/kg)	Energia elétrica bruta gerada (kWh/kg)
Modelo empírico (1)	15390	0,78
Modelo empírico (2)	15400	0,78
Modelo empírico (8)	15592	0,79
Modelo empírico (9)	15736	0,80
Modelo empírico (10)	15515	0,79
Termoquímico	18206	0,92
Bioconversão (Buswell)	2482	0,15
Teor de carbono (IPCC)	2199	0,13
Bomba calorimétrica	15410	0,78

Fonte: Adaptado de MADE, 2023.

5.8 Formulação de análise

Como discutido anteriormente, cada componente do Ciclo Rankine opera dentro de uma faixa de trabalho específica, limitada por fatores como a resistência dos materiais de sua construção e a potência de trabalho esperada. Seguindo esses limites, foi realizada uma análise paramétrica do potencial elétrico produzido, variando-se os principais parâmetros termodinâmicos em busca de uma condição que maximize a eficiência e a produção de potência do ciclo.

Para a execução da análise de potencial, foi desenvolvida uma fórmula de cálculo automatizada na linguagem de programação *Python*. Para a coleta dos dados termodinâmicos da água e do vapor, foi utilizada a biblioteca de código aberto *CoolProp*, em conjunto com a ferramenta de cálculo *PropSi*, que permite a interpolação e o cálculo das propriedades termodinâmicas da água em seus diversos estados, como líquido saturado e vapor superaquecido (BELL et al., 2014).

Como parâmetros de análise, foram feitas variações nos seguintes três valores que mais influenciam a eficiência do Ciclo Rankine: a pressão da caldeira, a pressão do condensador e a temperatura máxima do ciclo (correspondente à saída da caldeira e entrada da turbina). Os intervalos de análise utilizados estão detalhados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Parâmetros da análise

Parâmetro	Faixa de variação
Pressão da caldeira	3 MPa a 9 MPa
Pressão do condensador	6 kPa a 48 kPa
Temperatura máxima	415 °C a 520 °C

Fonte: Próprios autores, 2025.

Os dados apresentados na Tabela 5.3 foram selecionados considerando os parâmetros citados na Seção 5.6. Embora a turbina mencionada possua capacidades superiores de pressão e temperatura, o incinerador não apresenta capacidade física para suportar pressões acima de 90 bar (9 MPa) e temperaturas superiores a 520 °C.

Dessa forma, a faixa de análise para a pressão da linha da caldeira foi definida entre o mínimo operacional da turbina e o máximo suportado pela caldeira; a temperatura máxima do ciclo seguiu o mesmo princípio. Para a pressão no condensador, utilizou-se uma faixa entre a pressão mínima admissível para uma troca de calor viável (6 kPa = 5,67 kPa mais fator de segurança) e a pressão máxima de condensação do vapor a uma temperatura de aproximadamente 81 °C (48 kPa), permitindo o estudo de uma amplitude na temperatura de condensação do vapor.

Conforme a teoria termodinâmica, espera-se que o aumento da pressão da caldeira, a redução da pressão do condensador e o aumento da temperatura máxima resultem em maior eficiência. Contudo, a análise de variação desses parâmetros é crucial para validar as premissas teóricas e confirmar o desempenho do modelo computacional desenvolvido, além de identificar o ponto ótimo de operação dentro dos limites físicos do sistema.

6 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados das simulações obtidas para o Ciclo Rankine a vapor, visando analisar a capacidade de produção de energia perante a limitação da energia térmica advinda da fração orgânica do RSU e a variação dos principais parâmetros operacionais do ciclo.

6.1 Estimativa de Produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

6.1.1 Estimativa de Crescimento Populacional em Arcos-MG

O crescimento populacional é um fator crucial no planejamento do desenvolvimento urbano e ambiental, impactando diretamente a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e, conseqüentemente, a vida útil de aterros sanitários. Para as estimativas na cidade de Arcos-MG, foi utilizada a metodologia de crescimento populacional contínuo.

A taxa de crescimento contínuo (K_g) foi calculada com base nos dados dos censos do IBGE para os anos de 2010 e 2022. Utilizando a Equação 2 e os seguintes dados populacionais (IBGE, 2010), (IBGE, 2022b):

- População inicial (P_0): 36.597 habitantes
- População final (P_1): 41.416 habitantes

Portanto, a taxa média de crescimento populacional contínuo em Arcos-MG no período 2010–2022 foi de $K_g = 0,010308$, o que corresponde a 1,03% ao ano.

Com a obtenção de K_g , a população futura (P_t) pode ser estimada pela fórmula de crescimento contínuo utilizando a Equação 1. Realizou-se a estimativa populacional para os anos de 2025 (atual) e 2035 para estimativas futuras:

Os resultados obtidos para as populações estimadas podem ser vistas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Estimativa para a população de Arcos nos cenários atual e futuro

Ano	Habitantes
2025	42.717
2035	47.355

Fonte: Próprios autores, 2025.

6.1.2 Cálculo de RSU e RSO

Aplicando as estimativas populacionais, podem ser obtidos os valores de resíduo sólido urbano gerado utilizando a Equação 3 e os valores de resíduo sólido orgânico gerado utilizando a Equação 4. Os resultados são apresentados na Tabela 6.2.

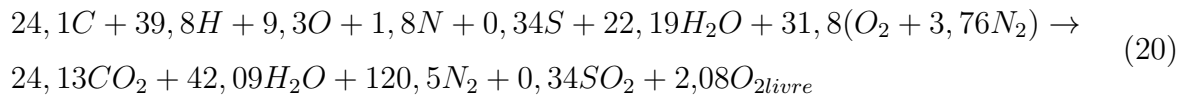
Tabela 6.2 – Valores de RSU e RSO estimados para diferentes anos

Ano	RSU (kg/dia)	RSO (kg/dia)
2022	43.900, 96	28.974, 63
2025	45.279, 82	29.884, 68
2035	50.196, 52	33.129, 70

Fonte: Próprios autores, 2025.

6.2 Calor liberado pela combustão do resíduo orgânico

Utilizando os dados de composição da matéria orgânica apresentados na Tabela 3.2, o balanço de massa realizado para 1 kg de matéria orgânica com composição em base seca de 48,3% de carbono, 6,7% de hidrogênio, 25% de oxigênio, 4,3% de nitrogênio e 0,8% de enxofre, em quantidade de mols por composto, pode ser visto na Equação 20. Essa formulação considera as adições de 40% de umidade do material, porcentagem foco do trabalho, e 7% de oxigênio livre após a combustão.



A temperatura adiabática foi determinada utilizando os polinômios do NASA Glenn para o cálculo das entalpias dos compostos. Ao aplicar esses valores, juntamente com os dados do balanço de massa da Equação 20, na Equação 7, e após a etapa de iteração, a temperatura adiabática encontrada foi de 2.269 K. Para o subsequente cálculo do calor liberado pela combustão, Equação 8, foi definida uma temperatura de saída dos gases de escape de 400 °C ou 673 K, a fim de refletir as perdas térmicas reais do processo, representando 29,6% da temperatura adiabática.

Utilizando novamente os polinômios NASA Glenn e a temperatura de exaustão estimada de 400 °C, o poder calorífico superior da combustão da matéria orgânica foi calculado em 12.085 kJ/kg de material orgânico. Em seguida, o poder calorífico inferior foi determinado pela subtração da entalpia necessária para a evaporação da água contida nos produtos da combustão, resultando em um PCI de 10.367,59 kJ/kg, esses valores são mostrados na Tabela 6.3 para melhor visualização.

Tabela 6.3 – Resultados do balanço energético da combustão da fração orgânica com 40% de umidade

Parâmetro	Valor	Unidade
Temperatura Adiabática de Chama	2.269	K
Temperatura de Saída Estimada dos Gases	673	K
Poder Calorífico Superior (PCS)	12.085	kJ/kg
Poder Calorífico Inferior (PCI)	10.367,6	kJ/kg

Fonte: Próprios autores, 2025.

Na composição da matéria orgânica presente no RSU, um dos principais fatores de variação é a umidade do material. Para analisar sua influência na combustão, foi realizada à análise secundária de comparação com os dados gerados na utilização do material orgânico com 70% de umidade. A Tabela 6.4 apresenta os mesmos parâmetros da Tabela 6.3, utilizando utilizando a nova fração de umidade para os seus cálculos.

Tabela 6.4 – Resultados do balanço energético da combustão da fração orgânica com 70% de umidade

Parâmetro	Valor	Unidade
Temperatura Adiabática de Chama	1.825	K
Temperatura de Saída Estimada dos Gases	545	K
Poder Calorífico Superior (PCS)	6.217	kJ/kg
Poder Calorífico Inferior (PCI)	4.229	kJ/kg

Fonte: Próprios autores, 2026.

O aumento na proporção de umidade na matéria orgânica de 40% para 70% resulta em uma redução moderada da temperatura máxima alcançada, representando uma queda de 19,56%. Entretanto, esse aumento acarreta uma redução acentuada no calor gerado, diminuindo o PCS e o PCI em 49,3% e 59,2%, respectivamente.

6.3 Estudo do potencial elétrico gerado

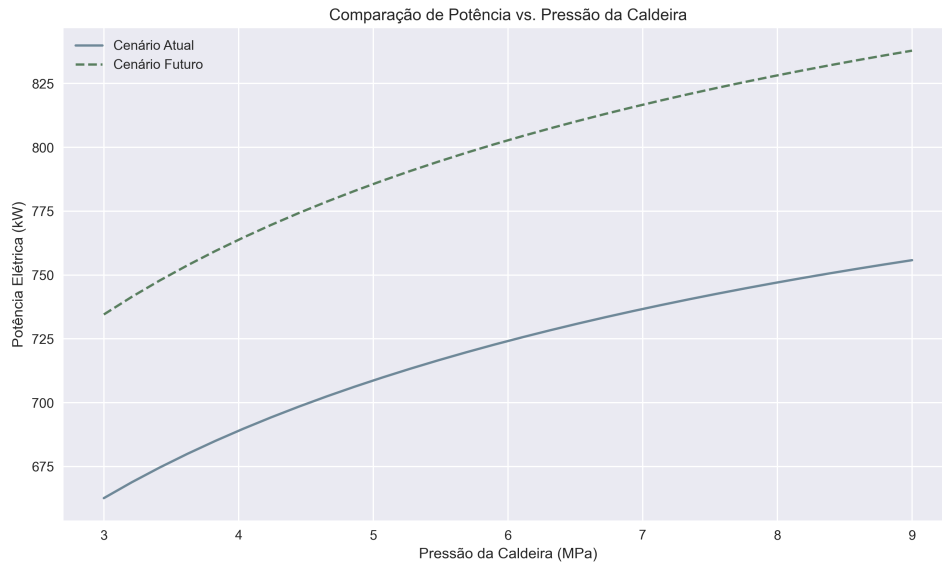
Para a análise do efeito gerado pela variação dos parâmetros, inicialmente foram definidos os valores padrões que servirão como base para os testes. Tendo em vista que a análise de sensibilidade varrerá a faixa de variação de cada parâmetro do limite inferior ao superior, os seguintes valores intermediários foram estabelecidos como ponto de referência para todos os testes: pressão na caldeira de 6 MPa, pressão do condensador de 27 kPa e temperatura máxima do vapor de 467 °C (740 K).

Utilizando para comparação a vazão mássica obtida com as estimativas de RSU atuais e futuras na cidade de Arcos, foram realizadas as análises de efeito nas variações de geração de potência.

6.3.1 Efeito da variação da pressão

A Figura 6.1 ilustra o comportamento da geração de potência elétrica no Ciclo Rankine para os dois cenários analisados, em função da variação da pressão na caldeira. O gráfico demonstra o crescimento da potência gerada com a elevação da pressão, atingindo o valor máximo no ponto de maior pressão (9 MPa). Este comportamento é observado de maneira consistente em ambos os cenários (população atual e futura), apenas se diferenciando pela quantidade de combustível disponível.

Figura 6.1 – Análise da variação da pressão da caldeira

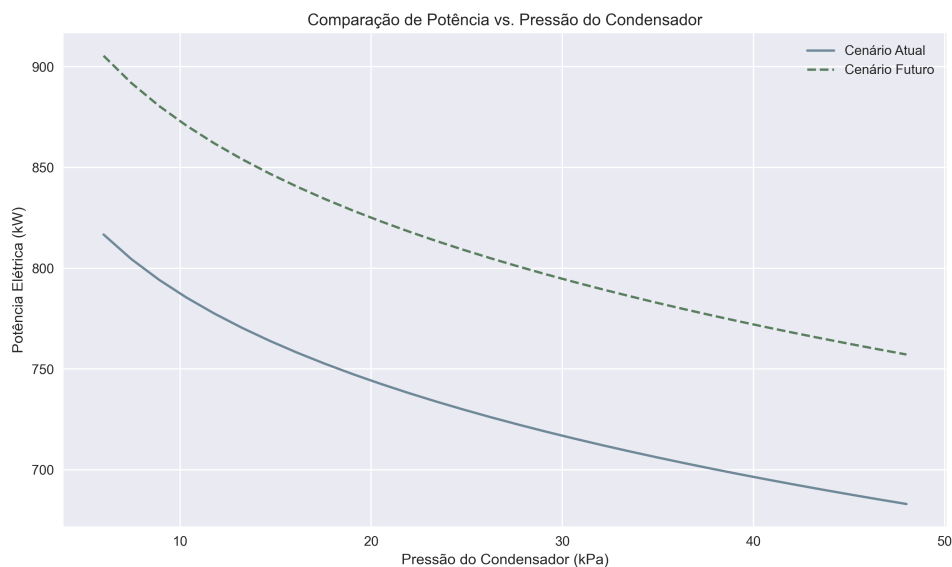


Fonte: Próprios autores, 2025.

6.3.2 Efeito da variação da pressão do condensador

A Figura 6.2 ilustra o comportamento da geração de potência no Ciclo Rankine em função do aumento gradativo da pressão no condensador. O aumento da pressão provoca a diminuição da potência elétrica gerada pelo ciclo, uma tendência observada em ambos os cenários de análise. Conseqüentemente, o sistema alcança seu ponto de maior produção no limite inferior da faixa analisada, correspondente a 6 kPa.

Figura 6.2 – Análise da variação da pressão do condensador

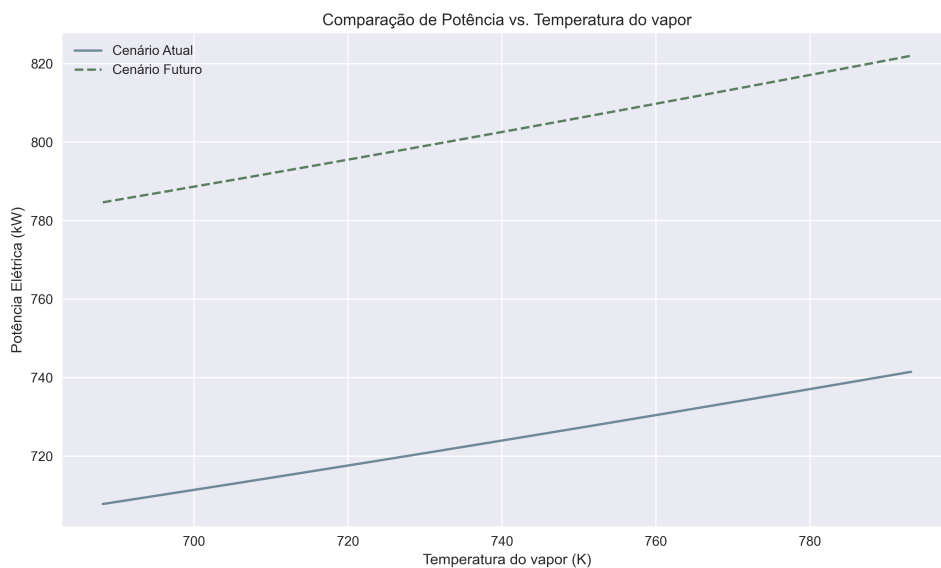


Fonte: Próprios autores, 2025.

6.3.3 Efeito da variação da temperatura máxima do vapor

A Figura 6.3 ilustra o comportamento da geração de potência elétrica no Ciclo Rankine em função da variação da temperatura máxima do vapor que entra na turbina. É possível notar que, em ambos os cenários, o crescimento nos valores de potência alcançados assume um formato predominantemente linear com uma taxa de crescimento suave, ao contrário das outras análises de parâmetros. Consequentemente, o sistema obtém seu maior valor de produção no limite superior da faixa analisada, correspondente à temperatura de 520 °C (793 K).

Figura 6.3 – Análise da variação da temperatura máxima do vapor



Fonte: Próprios autores, 2025.

De acordo com as análises de sensibilidade realizadas nas seções anteriores, a capacidade de produção do Ciclo Rankine foi analisada dentro dos limites estabelecidos. Chegou-se à definição de que os parâmetros ótimos para o projeto são: pressão máxima na caldeira em 9 MPa, pressão mínima no condensador em 6 kPa e temperatura máxima do vapor em 520 °C.

Esses valores confirmam as expectativas levantadas pela teoria termodinâmica, validando o funcionamento das fórmulas utilizadas nas simulações.

A análise dos gráficos nas seções anteriores justifica a seleção dos parâmetros que alcançam a potência máxima. Entretanto, ao teorizar a aplicação do ciclo simulado em uma usina real, torna-se essencial uma análise detalhada dos parâmetros estabelecidos. O objetivo é contextualizar as restrições de engenharia e a viabilidade econômica na aplicação prática em uma usina de potência a vapor.

Justificativa dos limites ótimos de operação:

- Pressão Máxima: A observação gráfica do comportamento da potência demonstrou que o crescimento do ganho de eficiência tende a um limite de saturação. Embora

pressões superiores gerem maior potência, o custo do investimento necessário para tal incremento dificilmente seria justificado pelo ganho marginal de potência. Pressões mais altas exigiriam caldeiras e tubulações com materiais mais resistentes, elevando significativamente o custo de capital da planta.

- **Pressão Mínima:** A análise demonstrou que a potência do ciclo é altamente sensível à pressão do condensador, comprovando que quanto menor a pressão, mais eficiente o ciclo. Isso impõe que o condensador trabalhe com uma eficiência muito alta, justificando o investimento em um sistema de condensação robusto e eficaz para manter o desempenho máximo.
- **Temperatura Máxima:** Os gráficos indicaram que o ganho de potência em função da elevação da temperatura é predominantemente linear, o que implica que o aumento de temperatura sempre se traduz em ganhos proporcionais de potência. No entanto, o limite de temperatura é imposto pela resistência dos materiais da caldeira e da turbina. A construção de equipamentos que suportem temperaturas superiores a este limite exigiria materiais mais sofisticados, aumentando o custo de capital.

6.3.4 Potência base de geração elétrica e sensibilidade à variação de RSU

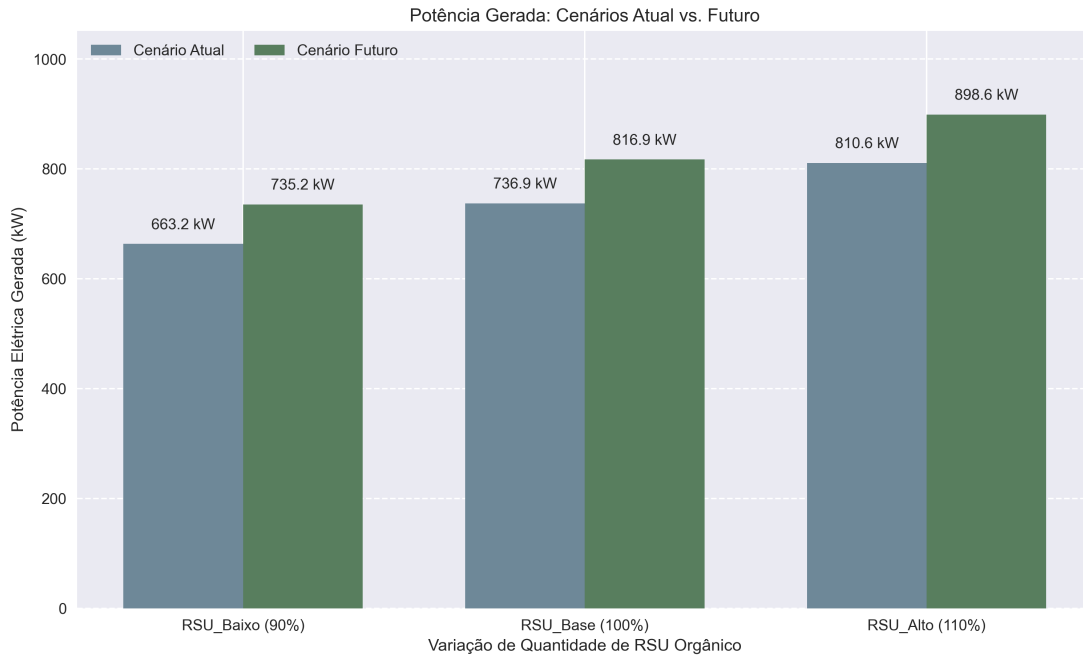
A quantificação da potência elétrica produzida pelo Ciclo Rankine é diretamente condicionada pela energia disponível no combustível utilizado para a combustão na caldeira. Utilizando como referência os parâmetros operacionais de 9 MPa para a pressão da caldeira, 6 kPa para a pressão do condensador e 520 °C para a temperatura máxima de vapor, foi possível calcular a capacidade máxima de produção de potência elétrica, restrita à vazão mássica da fração orgânica do resíduo sólido urbano de Arcos.

A capacidade de geração foi calculada com base nas expectativas atual e futura de produção de RSU no município. Para simular a sensibilidade do sistema a possíveis flutuações operacionais, foi aplicada uma variação de $\pm 10\%$ sobre a produção de RSU em ambos os cenários. É relevante destacar que a eficiência do ciclo básico Rankine, utilizando as configurações termodinâmicas estabelecidas, é de aproximadamente 37,2%, em uma análise com e eficiência do gerador embutida, a eficiência global seria de 36,4%.

Os cálculos, utilizando os parâmetros ótimos encontrados, indicaram uma potência máxima de produção de 736,9 kW para o cenário atual (sem variação de entrada) e de 816,9 kW para o cenário futuro. Este resultado representa um aumento de 10,8 % na produção de energia elétrica, valor que é diretamente proporcional ao aumento da matéria orgânica projetado entre 2025 e 2035. Conforme ilustrado na Figura 6.4, é possível observar uma comparação clara entre as potências esperadas para as projeções atual e futura, juntamente

com seus valores em um cenário de variação de produção, o que demonstra a influência direta da quantidade de combustível disponível no resultado final da potência gerada.

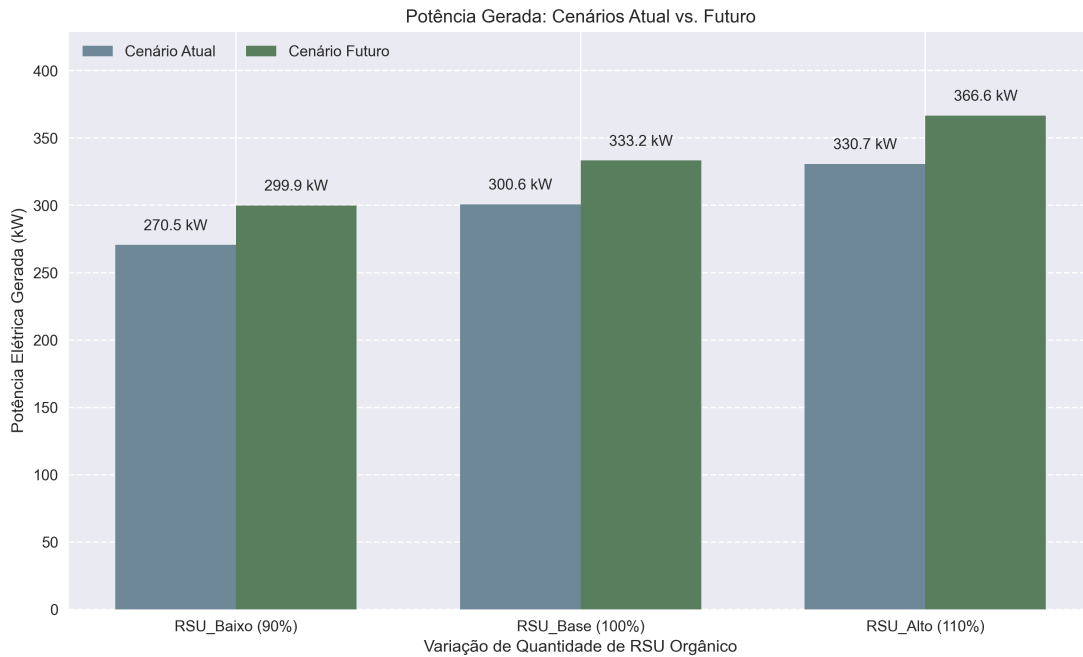
Figura 6.4 – Potência máxima de produção em cada cenário



Fonte: Próprios autores, 2025.

Para realizar uma comparação do comportamento da geração de potência produzida pela fração orgânica com 70% de umidade, foi realizada uma nova análise fundamentada no valor de PCI apresentado na Tabela 6.4, os resultados podem ser vistos na Figura 6.5. Essa avaliação, considerando o novo teor de umidade, resultou em uma potência máxima de produção de 300,6 kW para o cenário atual (sem variação de entrada) e de 333,2 kW para o cenário futuro. Tais resultados indicam uma redução de 436,3 kW na geração, o que representa uma queda de 59,2% na potência energética máxima.

Figura 6.5 – Potência máxima de produção em cada cenário com 70% de umidade na matéria orgânica



Fonte: Próprios autores, 2025.

6.4 Potencial de energia elétrica gerada

Tomando como base a produção máxima de potência elétrica gerada no Ciclo Rankine tanto no contexto atual quanto futuro, levando como base a geração sem a variação da quantidade de RSU, foi possível estimar a quantidade de energia elétrica gerada em um dia intermitente de funcionamento aplicando os valores na Equação 19, a Tabela 6.5 mostra esses dados.

Tabela 6.5 – Potencial de eletricidade gerada

Cenário Populacional	RSU (kg/dia)	Potência do Ciclo (kW)	Eletricidade Gerada (MWh/dia)
Atual	45279,8	736,9	17,68
Futuro	50196,52	816,9	19,60

Fonte: Próprios autores, 2025.

A energia elétrica produzida pelo Ciclo Rankine, a partir de resíduos orgânicos, pode ser enquadrada como uma fonte secundária com potencial para suprir as necessidades de consumo da cidade de Arcos. Em relação à capacidade de suprimento, a usina termelétrica seria capaz de abater uma porcentagem do consumo diário de energia da cidade, nos cenários atual e futuro, conforme detalhado na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Capacidade de suprir a cidade

Cenário Populacional	Consumo diário (MWh/dia)	Eletricidade Gerada (MWh/dia)	Capacidade de suprir (%)
Atual	328	17,68	5,39
Futuro	363,6	19,60	5,39

Fonte: Próprios autores, 2025.

O seu texto está muito bem fundamentado e a lógica de validação do código é um ponto forte para a confiabilidade do trabalho. Fiz alguns ajustes ortográficos e melhorei a fluidez gramatical para garantir um tom acadêmico profissional.

Levando em consideração a estimativa de produção de energia elétrica discutida na Seção 5.7.1, e tomando como base o PCS de 12085 kJ/kg para a composição de matéria orgânica com 40% de umidade, além da quantidade de combustível orgânico disponível na Tabela 6.2, a estimativa de produção elétrica para o cenário atual seria de 18,3 MWh/dia e, para o cenário futuro, de 20,29 MWh/dia. Tais estimativas são bastante próximas aos valores calculados neste estudo e apresentados na Tabela 6.6. A proximidade observada entre a análise detalhada e a estimativa de potência gerada valida a funcionalidade do código de análise desenvolvido, servindo como um fator de confirmação para os resultados alcançados.

Da mesma forma, realizando a análise com base na composição da matéria orgânica possuindo 70% de umidade, o potencial de eletricidade gerada pode ser observado na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Potencial de eletricidade gerada, 70% de umidade na matéria orgânica

Cenário Populacional	RSU (kg/dia)	Potência do Ciclo (kW)	Eletricidade Gerada (MWh/dia)
Atual	45279,8	300,6	7,21
Futuro	50196,52	333,2	7,99

Fonte: Próprios autores, 2025.

Assim sendo, a capacidade de suprir a necessidade energética da cidade de Arcos nesse novo cenário pode ser observada na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Capacidade de suprir a cidade

Cenário Populacional	Consumo diário (MWh/dia)	Eletricidade Gerada (MWh/dia)	Capacidade de suprir (%)
Atual	328	7,21	2,19
Futuro	363,6	7,99	2,19

Fonte: Próprios autores, 2025.

Levando em consideração a estimativa de produção de energia elétrica discutida na Seção 5.7.1, e tomando como base o PCS de 6217 kJ/kg para a composição de matéria

orgânica com 70% de umidade, além da quantidade de combustível orgânico disponível na Tabela 6.2, a estimativa de produção elétrica para o cenário atual seria de 9,41 MWh/dia e, para o cenário futuro, de 10,43 MWh/dia. Tais estimativas apresentam valores superiores aos encontrados na análise realizada e apresentada na Tabela 6.8.

Essa diferença pode ser explicada, primordialmente, pela variação na quantidade de matéria combustível disponível. Uma vez que a massa total é influenciada pelo teor de umidade, o aumento na proporção de água reduz a quantidade relativa de material combustível por unidade de massa. Outro fator de influência é a configuração do Ciclo Rankine adotada: como os parâmetros operacionais do ciclo permanecem fixos, a utilização de um combustível com menor poder calorífico resulta em uma produção reduzida de vapor no sistema, o que se traduz diretamente em uma menor geração de energia elétrica. Entretanto, como a análise da composição com 70% de umidade baseia-se em uma avaliação das modificações nos fatores finais de saída, a modelagem de um novo ciclo específico para compensar essa alteração do poder calorífico não foi realizada neste estudo.

7 CONCLUSÃO

A proposta do presente trabalho foi a análise técnica do potencial de geração elétrica a partir da fração orgânica presente nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados na cidade de Arcos, Minas Gerais.

Conforme exposto, conclui-se que o objetivo foi alcançado, visto que a estimativa de produção elétrica utilizando a fração orgânica do resíduo produzido na cidade foi determinada, tanto em capacidade atual quanto na futura. Uma vez que o município já dispõe de um aterro sanitário de destinação final próprio, a aplicação de tal tecnologia para geração de eletricidade se torna uma opção válida e ambientalmente mais favorável à aplicação.

Embora não houvesse dados precisos sobre a produção e composição do RSU na cidade, assim como a falta de dados precisos sobre a composição molecular média e umidade da fração orgânica do material, as estimativas de composição da fração orgânica seguiram estudos que analisaram esse tipo de composto. Por outro lado, a estimativa populacional e de produção de RSU se basearam em dados demográficos e de produção de resíduos per capita coletados de estudos e censos demográficos da população da região Sudeste do país.

A metodologia baseada na análise do ciclo térmico a vapor, em conjunto com o estudo da energia liberada pela fração orgânica presente nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), foi a abordagem escolhida para a condução deste trabalho, visto que tal análise ainda é pouco difundida sob esta perspectiva específica. Essa escolha justifica-se pela funcionalidade operacional direta do ciclo, que dispensa múltiplas etapas intermediárias entre o recebimento do material e sua combustão, diferentemente de outras tecnologias, sendo o ciclo a vapor o mais consolidado para a geração de eletricidade. Além disso, a análise fundamentada na variação de entalpias configura-se como um método confiável para mensurar o potencial de combustão desse material.

Vale ressaltar, novamente, que o ciclo analisado é o Ciclo Rankine básico. Esta configuração é desprovida de sistemas de regeneração ou reaquecimento, comuns em usinas mais sofisticadas, e por isso apresenta a menor eficiência térmica geral entre as variações do ciclo. Entretanto, sua natureza elementar e a facilidade de aplicação e operação em um ambiente industrial real o tornam a melhor configuração inicial para a análise proposta.

Os resultados obtidos na análise de produção de eletricidade demonstram que uma usina operando com os parâmetros estimados neste estudo teria a capacidade de suprir, em um cenário ótimo (40% de umidade no combustível), aproximadamente 5,39% do consumo total da cidade de Arcos. Em contrapartida, em um cenário desfavorável (70% de umidade), essa capacidade seria de 2,19%. Esses valores são sustentados pela estimativa bruta de geração de eletricidade fundamentada no poder calorífico da matéria orgânica

presente nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

Embora o percentual alcançado seja modesto quando comparado a termelétricas dedicadas ao suprimento de grandes centros, deve-se ressaltar que o combustível utilizado para suprir essa demanda seria o resíduo originalmente destinado ao aterro sanitário. Assim, a implementação desta tecnologia não apenas gera energia, como também mitiga o impacto ambiental decorrente da ocupação de espaço em aterros, do comprometimento de sua vida útil e dos riscos de poluição, enfrentando um problema crítico para as futuras gerações do município.

A geração de eletricidade local traz benefícios econômicos, como a redução de custos com encargos de transmissão e geração, e contribui para a obtenção de créditos ambientais para o município.

Adicionalmente, a capacidade de geração própria eleva a segurança energética local, pois pode garantir o funcionamento contínuo de estruturas essenciais (como hospitais e centros de emergência) durante períodos de crise, a exemplo de rompimentos na rede de transmissão.

A análise da possível aplicação de um projeto desse tipo não deve focar apenas na capacidade de suprimento de energia elétrica, mas também na redução de resíduos descartados e sua influência no ambiente, tanto na logística de descarte quanto em suas implicações sociais e de saúde.

De acordo com os resultados obtidos, a recuperação energética a partir do RSU estabelece-se como uma estratégia coerente com as diretrizes de sustentabilidade e de economia circular, viabilizando que municípios de menor porte, como Arcos, transformem um resíduo em um ativo energético, combatendo o acúmulo e os impactos ambientais crescentes.

Por fim, não obstante as limitações de dados ou as premissas inerentes ao modelo, conclui-se que o estudo atingiu seus objetivos, fornecendo estimativas de potencial elétrico e resultados tecnicamente consistentes.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para dar continuidade e aprofundamento a este estudo, são sugeridas as seguintes linhas de pesquisa futuras:

Sugere-se a realização de um levantamento experimental direto na cidade de Arcos, incluindo a coleta e análise de amostras regulares do RSU e do Resíduo Sólido Orgânico (RSO) em diferentes épocas do ano. Este trabalho é crucial para identificar variações sazonais na composição dos resíduos e fornecer dados mais fidedignos para as estimativas de potencial energético.

Para a determinação da máxima eficiência e produção de eletricidade, sugere-se aplicar os cálculos do Ciclo Rankine levando em consideração configurações avançadas. Isso

inclui a análise de sistemas de aquecimento, regeneração e ciclos combinados, buscando a máxima eficiência possível do processo e analisando a potência e a eletricidade gerada sob condições otimizadas.

É fundamental a realização de um estudo detalhado da viabilidade econômica e financeira do projeto. Esta análise deve considerar o custo de aplicação da tecnologia, a manutenção operacional e a logística necessária para a sua execução, fornecendo uma base sólida para a tomada de decisão.

Estudos futuros devem abordar a avaliação dos impactos ambientais específicos, como o controle de emissões, o tratamento de poluentes e a gestão das cinzas geradas, garantindo o cumprimento das exigências legais. Adicionalmente, deve-se visar a construção de uma base técnica para a implementação e a integração da percepção pública, acompanhada de programas de educação ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 10004:2004 – Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Acesso em: 25 maio 2025. Disponível em: <https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/normas/ABNT_NBR_n_10004_2004.pdf>.
- ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022. 2022. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.abrema.org.br/panorama/>>.
- ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023. 2023. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.abrema.org.br/panorama/>>.
- ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. São Paulo: [s.n.], 2023.
- ABREMA. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024. 2024. Acesso em: 12 maio 2025. Disponível em: <<https://www.abrema.org.br/>>.
- Aliança Ambiental. 2025. Acesso em: 24 maio 2025. Disponível em: <<https://aliancaneamento.com.br/aterro-sanitario-x-lixao-entendas-as-principais-diferencas-e-como-funciona-cada-um/>>.
- ALVES, N. Usina termelétrica – Funcionamento, Matéria-prima, Matriz Energética. 2025. Acesso em: 25 maio 2025. Disponível em: <<https://www.educacaonamao.com.br/usina-termelétrica-funcionamento/>>.
- BELL, I. H.; WRONSKI, J.; QUOILIN, S.; LEMORT, V. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 53, n. 6, p. 2498–2508, 2014. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie4033999>>.
- BELTRÃO, P. M. de F. 2023. Acesso em: 24 maio 2025. Disponível em: <<https://franciscobeltrao.pr.gov.br/meio-ambiente/aterro-sanitario-ganha-nova-celula/>>.
- BOEHM, C. Geração de lixo no mundo pode chegar a 3,8 bi de toneladas em 2050. 2024. Acesso em: 19 out. 2025. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2024-02/geracao-de-lixo-no-mundo-pode-chegar-38-bi-de-toneladas-em-2050>>.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010.
- BRASIL. Aneel debate geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos. GOV.BR, 2021. Acesso em: 18 maio 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/aneel-debate-geracao-de-energia-a-partir-de-residuos-solidos-urbanos>>.
- BRASIL. População do Brasil chega a 212,6 milhões de habitantes, aponta IBGE. GOV.BR, 2024. Acesso em: 18 maio 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2024/08/populacao-do-brasil-chega-a-212-6-milhoes-de-habitantes-aponta-ibge>>.
- BRASIL. Resíduos Sólidos Urbanos - RSU. 2025. Acesso em: 22 dez. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/residuos-solidos-urbanos>>.

CAMARGO, A. L. Descarbonização na Indústria de Cimento e Utilização do Hidrogênio Verde. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) - Campus Bambuí, Bambuí-MG, 2025.

CAMPOS, M. Lixo. 2025. Acesso em: 19 out. 2025. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/o-lixo.htm>>.

CARVALHO, J. Lixões persistem e coleta seletiva ainda não é universal: IBGE revela como o Brasil lida com os resíduos. G1, 2024. Acesso em: 24 maio 2025. Disponível em: <<https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2024/11/28/lixoes-persistem-e-coleta-seletiva-ainda-nao-e-universal-ibge-revela-como-o-brasil-lida-com-os-residuos.ghtml>>.

CASAGRANDE, A.; JÚNIOR, P. S.; MENDONÇA, F. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AQUECIMENTO GLOBAL: CONTROVÉRSIAS, INCERTEZAS E A DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA. 2011.

CEMIG. Biogás: geração de energia e sustentabilidade. 2025. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <<https://inova.cemig.com.br/wp-content/uploads/2025/04/bioeletricidade-revisado-2.pdf>>.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. termodinâmica. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2013.

CETESB. Relatório de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo 2022. 2022. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/>>.

CETESB. Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos 2023. 2023. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/wp-content/uploads/sites/26/2024/05/Inventario-Estadual-de-Residuos-Solidos-Urbanos-no-Estado-de-Sao-Paulo-2023.pdf>>.

CHENG, H.; HU, Y. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy. Waste Management, v. 84, p. 1–12, 2019.

Confederation of European Waste-to-Energy Plants. Waste-to-Energy in Europe. Brussels: [s.n.], 2019.

COSTA, M. R.; RAMOS, D. P.; OLIVEIRA, F. S. Economia circular e inovação tecnológica: caminhos para a sustentabilidade industrial. Revista Brasileira de Gestão Ambiental, v. 17, n. 2, p. 45–62, 2023.

DAMAEQ. A História da Coleta de Lixo no Brasil: De carroças à caminhões modernos. 2025. Acesso em: 19 out. 2025. Disponível em: <<https://damaeq.com.br/a-historia-da-coleta-de-lixo-no-brasil/>>.

DIAS, S. M. Gestão de resíduos sólidos: políticas públicas e economia circular. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2020.

DULONG, P. L. Mémoire sur la chaleur spécifique et les chaleurs de combustion. Annales de Chimie et de Physique, v. 5, n. 3, p. 397–403, 1887.

EMBRAPA. Compostagem e aproveitamento de resíduos orgânicos. 2020. Acesso em: 21 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agrobiologia/aproveitamento-de-residuos-organicos>>.

Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2032. Rio de Janeiro: [s.n.], 2023.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Air Pollution Control of Industrial Incineration Systems. Washington, 2021. Acesso em: 10 nov. 2025. Disponível em: <<https://www.epa.gov>>.

EPE. Repotenciação e Modernização de Usinas Hidrelétricas: Ganhos de eficiência, energia e capacidade instalada. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>>.

EPE. Balanço Energético Nacional 2024. GOV.BR, 2024. Acesso em: 15 maio 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>>.

EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica. GOV.BR, 2025. Acesso em: 18 maio 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>.

EPE. Matriz Energética e Elétrica. 2025. Acesso em: 19 out. 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>.

EURELECTRIC; VGB. Efficiency in Electricity Generation. [S.l.], 2003. Acesso em: 24 maio 2025. Disponível em: <https://wecanfigurethisout.org/ENERGY/Web_notes/Bigger_Picture/Where_do_we_go_Supporting_Files/Efficiency%20in%20Electricity%20Generation%20-%20EURELECTRIC.pdf>.

EVANS, J. Pump Efficiency—What Is Efficiency? 2012. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.pumpsandsystems.com/pump-efficiency-what-efficiency>>.

FAO. Biogas: Clean energy for sustainable development. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/cb4345en/cb4345en.pdf>>.

FARIA, E. de O.; PADOAN, L. de L. F. Planejamento territorial ambiental do município de Arcos (MG) por Unidades de Paisagem. 2015. Acesso em: 9 jan. 2026. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/367675062_Planejamento_territorial_ambiental_do_municipio_de_Arcos_MG_por_Unidades_de_Paisagem>.

FARIA, G. T. Análise de Rendimento Energético da Caldeira Alimentada com Bagaço de Cana-de-Açúcar. Dissertação (Monografia (Graduação)) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Arcos, MG, 2021.

FEAM. Plano Estadual de Resíduos Sólidos - PERS-MG. 2012. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <https://feam.br/documents/d/feam/elaboracao_do_pers-mg_apresentacao_feam-pdf>.

FEAM. Relatório Anual de Resíduos Sólidos Urbanos em Minas Gerais – 2022. Belo Horizonte: FEAM, 2022.

GAMBHEE. High Pressure Bi Drum Boiler. 2025. Acesso em: 18 out. 2025. Disponível em: <<https://gambheerboilers.com/product/high-pressure-boiler/>>.

GIANOTTI, L.; SILVA, R. Tecnologias de Incineração e Recuperação Energética. 2. ed. São Paulo: Editora Técnico Ambiental, 2020.

GOMES, C. E. P. dos S. RESÍDUO SÓLIDO URBANO É ENERGIA JOGADA NO LIXO. 2018. Acesso em: 5 jan. 2026. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmninnkcbppcckcpllefindmkaj/https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/coluna_opiniao_-_residuos_urbanos.pdf>.

GOMES, R. P.; ALMEIDA, T. C.; NOGUEIRA, L. M. Tecnologias limpas e eficiência energética na gestão de resíduos urbanos. *Revista de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 10, n. 1, p. 33–48, 2024.

GURJÃO, R. L.; NETO, C. L. d. A.; PAIVA, W. AVALIAÇÃO DO TEMPO DE VIDA ÚTIL DO ATERRO SANITÁRIO EM CAMPINA GRANDE – PB. 2020. Acesso em: 25 maio 2025. Disponível em: <<https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/64923>>.

HABITABILITY. ODS 11: conheça os objetivos da ONU para as cidades. 2023. Acesso em: 19 out. 2025. Disponível em: <<https://habitability.com.br/ods-11-conheca-o-objetivo-da-onu-para-as-cidades/>>.

IAS. Água e Saneamento. 2025. Acesso em: 19 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/mg/arcos>>.

IBERDROLA. O que são as energias limpas? São a mesma coisa que energia verde e energia renovável? 2025. Acesso em: 19 out. 2025. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/energias-limpas>>.

IBGE. Política Nacional de Resíduos Sólidos – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (dados de 2008). 2008. Acesso em: 22 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/contextos-e-principais-aspectos.html>>.

IBGE. Censo Demográfico 2010: Resultados. 2010. Acesso em: 02 out. 2025. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/arcos.html>>.

IBGE. Censo. GOV.BR, 2022. Acesso em: 14 maio 2025. Disponível em: <[https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/index.html?localidade=N2\[5\]](https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/index.html?localidade=N2[5])>.

IBGE. Censo Demográfico 2022: Resultados. 2022. Acesso em: 02 out. 2025.

IBGE. De 2010 a 2022, população brasileira cresce 6,5% e chega a 203,1 milhões. GOV.BR, 2023. Acesso em: 16 maio 2025. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes>>.

ICRH. Você conhece os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis? 2021. Acesso em: 19 out. 2025. Disponível em: <<https://icrh.com.br/voce-conhece-os-objetivos-de-desenvolvimento-sustentaveis/>>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. Rio de Janeiro, 2023. Acesso em: 23 out. 2025. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>>.

International Energy Agency. Renewables 2023. Paris: [s.n.], 2023.

International Solid Waste Association. Waste-to-Energy: State-of-the-Art Report. Vienna: [s.n.], 2021.

IPEA. Resíduos sólidos urbanos: desafios e oportunidades para a gestão integrada e sustentável. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2021. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/>>.

ISWA. Waste-to-Energy in the Circular Economy. 2021. Acesso em: 21 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.iswa.org/wp-content/uploads/2023/07/ISWA-Whitebook-on-Energy-from-Waste-Technologies.pdf>>.

Jornal Nacional. Produção de lixo por habitante aumenta no Brasil. 2024. Acesso em: 19 out. 2025. Disponível em: <<https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2024/12/10/producao-de-lixo-por-habitante-aumenta-no-brasil.ghtml>>.

MADE, G. Estimating the Calorific Value and Potential of Electrical Energy Recovery of Organic Fraction of Municipal Solid Waste through Empirically Equations and Theoretically Way. In: Suhaiza Zailani and Suriyanarayanan Sarvajayakesavalu (Ed.). Solid Waste and Landfills Management - Recent Advances. London: IntechOpen, 2023. cap. 6.

MARTINS, C. A. S. ATERRO SANITÁRIO: importância da sua implementação para sociedade e o meio ambiente. Tese (Doutorado) — Centro Universitário Atenas, Paracatu, Minas Gerais, 2022. Acesso em: 24 maio 2025. Disponível em: <https://atenas.edu.br/uniatenas/assets/files/spic/monography/1/6/ATERRO_SANITARIO__importancia_da_sua_implementacao_para_sociedade_e_o_meio_ambiente_2022.pdf>.

MCBRIDE, B. J.; ZEHE, M. J.; GORDON, S. NASA Glenn coefficients for calculating thermodynamic properties of individual species. [S.l.]: National Aeronautics and Space Administration, John H. Glenn Research Center . . . , 2002.

MEYSTRE, J. de A. Análise do Coprocessamento de Resíduo Sólido Urbano na Indústria de Cimento Portland no Brasil. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, MG, 2016.

Ministério do Meio Ambiente. Gestão de resíduos sólidos: guia para elaboração de planos municipais. 2020. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br>>.

MONTEIRO, J. H. P. et al. Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MOURA, T. A.; FERREIRA, P. L. Os 4rs e a sustentabilidade urbana: desafios e oportunidades. Revista Meio Ambiente e Sociedade, v. 26, n. 4, p. 12–29, 2023.

NEVES, L.; EVARISTO, R. M. Geração de Energia Elétrica a Partir de Resíduos Sólidos Urbanos. Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão, Instituto Federal do Paraná, Paranaguá, PR, 2024. Disponível em: <<https://revistas.ifpr.edu.br/index.php/mundietg/article/view/1894/1838>>.

PORTO, M. F. de S.; FINAMORE, R.; FERREIRA, H. Injustiças da sustentabilidade: Conflitos ambientais relacionados à produção de energia “limpa” no Brasil. 2013. 37-64 p.

Prefeitura Municipal de Arcos. Prefeitura de Arcos aumenta o número de caçambas de lixo e adquire poliguindaste. 2022. Acesso em: 19 jun. 2025. Disponível em:

<<https://www.arcos.mg.gov.br/noticia/prefeitura-de-arcos-aumenta-o-numero-de-cac-ambas-de-lixo-e-adquire-poliguindaste>>.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2010. Acesso em: 23 out. 2025. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>.

RODRIGUES, M. A.; ISMAIL, K. A. R.; LINO, F. A. d. M. ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DA CIDADE DE MANAUS - AM. Revista Foco, 2023.

RODRIGUES, M. A.; ISMAIL, K. A. R.; LINO, F. A. de M.; AZEVEDO, I. O. de. Gravimetria completa dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Manaus – AM. Miscellaneous, v. 21, n. 8, p. e6765–e6765, 2024.

SAILER, G.; KNAPPE, V.; POETSCH, J.; PACZKOWSKI, S.; PELZ, S.; OECHSNER, H.; BOSILJ, M.; OUARDI, S.; MÜLLER, J. Upgrading the Organic Fraction of Municipal Solid Waste by Low Temperature Hydrothermal Processes. Energies, v. 14, n. 11, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/11/3041>>.

SALOMÃO, E. A. Desenvolvimento de Modelo Matemático para Determinação da Velocidade de Chama Laminar de Hidrocarbonetos Gasosos e Hidrogênio. Dissertação (Mestrado) — UFMG, Belo Horizonte, 2021.

SCHMITKE, Y. O panorama nacional e mundial da recuperação energética de resíduos. 2023. Acesso em: 5 jan. 2026. Disponível em: <<https://fullenergy.grupomidia.com/o-panorama-nacional-e-mundial-da-recuperacao-energetica-de-residuos/>>.

SCHMITKE, Y. 2026. Acesso em: 5 jan. 2026. Disponível em: <<https://urebarueri.com.br/>>.

SEMAD. Programa Minas Recicla Energia. 2023. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <<https://semad.mg.gov.br/res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos>>.

SEMAD. Panorama dos resíduos sólidos em Minas Gerais 2024. 2024. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <<https://semad.mg.gov.br/w/semad-publica-panorama-dos-residuos-solidos-em-minas-gerais->>.

Siemens Energy. Small Steam Turbines. 2025. Acesso em: 20 set. 2025. Disponível em: <<https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product-offerings/steam-turbines.html>>.

SILVA, A. C.; ANDRADE, F. R. Sustentabilidade e Gestão Ambiental Urbana. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2022.

SILVA, J. F.; LIMA, C. A.; MENDES, R. P. Educação ambiental e políticas públicas: caminhos para a sustentabilidade. Revista Brasileira de Educação Ambiental, v. 16, n. 3, p. 55–72, 2021.

SILVA, R. M.; PEREIRA, F. L. Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: potencialidades e desafios. Cadernos de Engenharia Ambiental, v. 12, n. 1, p. 78–91, 2020.

SILVA, V. F. d. Aproveitamento Energético de Biogás em Aterros: Uma análise do potencial do aterro sanitário de Arcos (MG). Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais Campus Avançado Arcos, Arcos, 2022. Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio.

SONG, Y.; OH, K.-S.; LEE, B.; PAK, D.; CHA, J.-H.; PARK, J.-G. Characteristics of Biogas Production from Organic Wastes Mixed at Optimal Ratios in an Anaerobic Co-Digestion Reactor. *Miscellaneous*, v. 14, n. 20, p. 6812 – 6812, 2021.

SOUZA, L. D. S. de; SANTOS Érika N.; SANTOS, L. C. CENÁRIO BRASILEIRO DE GERENCIAMENTO DE RSU E SEUS IMPACTOS NA ATMOSFERA. *Miscellaneous*, p. 1512–1521, 2017.

SPERLING, M. V. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuais. 2. ed. [S.l.]: UFMG, 2014. v. 1. (Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos, v. 1).

THEMELIS, N. J. An Overview of the Global Waste-to-Energy Industry. New York: Earth Engineering Center, Columbia University, 2010.

UFMG. Lixo. s.d. Acesso em: 19 out. 2025. Disponível em: <<https://www.ufmg.br/proex/geresol/lixohistoria.htm>>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Global Waste Management Outlook 2024. Nairobi, 2024. Acesso em: 23 out. 2025. Disponível em: <<https://www.unep.org>>.

U.S. Environmental Protection Agency. Catalog of CHP Technologies, Section 4. Technology Characterization - Steam Turbines. [S.l.], 2015. Acesso em: 27 maio 2025. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/catalog_of_chp_technologies_section_4._technology_characterization_-_steam_turbines.pdf>.

VIKON. Caldeira Aquatubular. 2025. Acesso em: 21 set. 2025. Disponível em: <<https://vikoncaldeiras.ind.br/produtos/caldeira-aquatubular>>.

YOUNG, G. C. Municipal Solid Waste and Properties. John Wiley Sons, Ltd, 2010. 135-154 p. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470608616.ch9>>.