



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATÓRIO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Daniel dos Anjos Faria
Filipe de Luca Venâncio Andrade e Costa

**Estudo preliminar sobre a gaseificação de resíduos sólidos urbanos em escala
laboratorial**

Uberlândia
2023

Daniel dos Anjos Faria
Filipe de Luca Venâncio Andrade e Costa

**Estudo preliminar sobre a gaseificação de resíduos sólidos urbanos em escala
laboratorial**

Projeto de fim de curso para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.
Orientador: Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho

Uberlândia
2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F224 2023	<p>Faria, Daniel dos Anjos, 1998- Estudo preliminar sobre a gaseificação de resíduos sólidos urbanos em escala laboratorial [recurso eletrônico] / Daniel dos Anjos Faria. - 2023.</p> <p>Orientador: Solidônio Rodrigues de Carvalho. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. Carvalho, Solidônio Rodrigues de, 1978-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C837 2023	<p>Costa, Filipe de Luca Venâncio Andrade e, 1999- Estudo preliminar sobre a gaseificação de resíduos sólidos urbanos em escala laboratorial [recurso eletrônico] / Filipe de Luca Venâncio Andrade e Costa. - 2023.</p> <p>Orientador: Solidônio Rodrigues de Carvalho. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. Carvalho, Solidônio Rodrigues de, 1978-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

Daniel dos Anjos Faria
Filipe de Luca Venâncio Andrade e Costa

**Estudo preliminar sobre a gaseificação de resíduos sólidos urbanos em escala
laboratorial**

Este Projeto de final de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Mecânico” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

Uberlândia, 30 de Junho de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho
Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Daniel Dall'Onder dos Santos
Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Uberlândia

Doutoranda Rafaela Gomide Corrêa
Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Uberlândia

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de Uberlândia, especialmente à Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realizar este curso.

Ao nosso professor orientador, Solidônio Rodrigues de Carvalho, pela orientação e por nos disponibilizar os equipamentos e amostras para realização dos experimentos necessários.

Ao aluno de mestrado, Moisés, e ao aluno de doutorado, Eduardo, que nos ajudaram e nos auxiliaram nos experimentos.

Eu, Daniel, agradeço inicialmente à minha mãe e meu pai, Beatriz e Enivaldo, por sempre me mostrar o caminho a ser seguido, por serem sempre meus exemplos de luta, garra, determinação e que nunca mediram esforços para que eu pudesse seguir e conquistar os meus sonhos. Ao meu irmão, Gustavo, agradeço por todas as implicações, por todos os conselhos e ensinamentos. Posteriormente, gostaria de agradecer a minha namorada Viviane, e sua família pelo apoio incondicional, por sempre estar ao meu lado nos momentos difíceis e por sempre me incentivar a ser a minha melhor versão.

Eu, Filipe, agradeço à minha mãe, que sempre foi minha inspiração e meu pilar por toda vida, sempre me ensinando o caminho certo e a lutar por minhas conquistas. Agradeço, também, à toda minha família e meus amigos que estiveram comigo nesse período.

Juntos, agradecemos ao Alexandre Miguel, Clarissa Soares e José Paulo, que estiveram juntos com a gente desde o início da graduação. Passamos por várias coisas juntos e somos gratos pela amizade que construímos.

RESUMO

Uma questão que vem sendo cada vez mais levantada em diversos lugares do mundo é a geração de energia limpa. Isso porque a fonte da maioria dos combustíveis utilizados continua sendo de combustíveis fósseis. Isso traz uma maior degradação do meio ambiente quando comparada à utilização de outras fontes de energia. Além disso, outro assunto que tem ganhado muito destaque é o desafio da gestão de resíduos. O mundo como um todo gera muito lixo e a maioria não recebe nenhum tipo de tratamento, o que, novamente, resulta em prejuízo para o meio ambiente. Uma alternativa interessante é o aproveitamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) para a geração de energia, uma vez que também impacta na gestão do lixo gerado. Existem alguns processos que podem ser utilizados para a geração de energia a partir de RSU, como a incineração, a pirólise e a gaseificação. Esse trabalho tem o objetivo de tratar sobre a gaseificação, que pode ser entendida como um processo intermediário entre os outros dois. Como resultados da gaseificação são obtidas as cinzas e o gás de síntese, combustível que pode ser utilizado em vários tipos de ciclos motores. Neste trabalho foram analisados em escala laboratorial diferentes tipos de resíduos sólidos urbanos e o gás de síntese foi produzido. Por meio de análises termogravimétricas e calorimétricas determinou-se as propriedades das biomassas, enquanto que o gás de síntese foi analisado por meio de cromatografia gasosa. Os resultados comprovam que o gás de síntese produzido possui poder calorífico para aplicação em ciclos motores, comprovando que o processo de gaseificação de resíduos sólidos urbanos vale a pena ser implementado e explorado.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos; energia; gaseificação; gás de síntese; poder calorífico

ABSTRACT

An issue that has been increasingly raised in different parts of the world is the generation of clean energy. This is because the source of most of the fuels used continues to be fossil fuels. This brings a greater degradation of the environment when compared to the use of other energy sources. In addition, another subject that has gained a lot of attention is the challenge of waste management. The world as a whole generates a lot of waste and most of it does not receive any type of treatment, which, again, results in damage to the environment. An interesting alternative is the use of Municipal Solid Waste (MSW) for energy generation since it also impacts the management of waste generated. Some processes can be used to generate energy from MSW, such as incineration, pyrolysis, and gasification. This work aims to deal with gasification, which can be understood as an intermediate process between the other two. As a result of gasification, ashes, and synthesis gas are obtained, a fuel that can be used in various types of engine cycles. In this work, different types of MSW were analyzed on a laboratory scale, and synthesis gas was produced. Through thermogravimetric and calorimetric analysis, the properties of the biomasses were determined, while the synthesis gas was analyzed by gas chromatography. The results prove that the synthesis gas produced has a heating value for application in engine cycles, proving that the MSW gasification process is worth implementing and exploring.

Keywords: Municipal solid waste; energy; gasification; synthesis gas; heating value

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos resíduos sólidos em função da atividade de origem . . .	13
Figura 2 – Classificação dos resíduos sólidos domiciliares	13
Figura 3 – Geração de RSU no Brasil em 2022	14
Figura 4 – Participação das regiões na geração de RSU (%) em 2022	15
Figura 5 – Comparativo geração per capita entre 2021 e 2022	16
Figura 6 – Coleta de RSU no Brasil no ano de 2022	17
Figura 7 – Índice cobertura de coleta de RSU no Brasil e Regiões em 2022	17
Figura 8 – Disposição final RSU no ano de 2022.	18
Figura 9 – Gravimetria de resíduos sólidos urbanos.	19
Figura 10 – Exemplo de processo de gaseificação	22
Figura 11 – Exemplo de processo de combustão	25
Figura 12 – Moagem das amostras	26
Figura 13 – Mufla	27
Figura 14 – Analisador Termogravimétrico TGA-200A	27
Figura 15 – Calorímetro da marca IKA C200	28
Figura 16 – Balança Analítica	29
Figura 17 – Montagem Calorímetro	29
Figura 18 – Montagem do Reator	30
Figura 19 – Filtragem do Gás	31
Figura 20 – Tedlar	32
Figura 21 – Cromatógrafo gasoso Shimadzu GC-2014	33
Figura 22 – Processo de inserção no gás no cromatógrafo	33
Figura 23 – Curvas de degradação	34
Figura 24 – Curvas de degradação	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Disposição final de RSU no Brasil e regiões, por tipo de destinação em 2022.	18
Tabela 2 – Composição do Blend	30
Tabela 3 – Amostras Blend Peneirado e Cavaco	35
Tabela 4 – Poder calorífico superior amostras úmidas	36
Tabela 5 – Poder calorífico superior amostras secas	36
Tabela 6 – Composição em porcentagem de volume de cada componente presente no Gás de Síntese	37
Tabela 7 – Massa molar e entalpia de formação de cada componente do syngas . .	38
Tabela 8 – Balanços estequiométricos	38
Tabela 9 – Determinação do PCI das amostras	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS - RSU	12
3.1.1	Resíduos Sólidos Urbanos - Definição e Classificação	12
3.1.2	Geração de RSU	14
3.1.3	Coleta de RSU	16
3.1.4	Destinação final do RSU	18
3.1.5	Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos	18
3.2	GESTÃO DE RSU	20
3.2.1	Aterros Sanitários	20
3.2.2	Incineração	20
3.2.3	Pirólise	20
3.2.4	Gaseificação	21
3.2.5	Gás de Síntese	22
3.3	COMBUSTÃO	23
3.4	PODER CALORÍFICO	24
3.4.1	Entalpia	24
3.4.2	Entalpia de Formação e Entalpia de Combustão	24
3.4.3	Poder calorífico inferior e Poder calorífico superior	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	26
4.2	TERMOGRAVIMETRIA	27
4.3	CALORÍMETRO	28
4.4	GERAÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE	29
4.5	ANÁLISE CROMATOGRÁFICA	33
5	RESULTADOS	34
5.1	ANÁLISE DAS COMPOSIÇÕES	34
5.2	ANÁLISE CALORIMÉTRICA	35
5.3	ANÁLISE CROMATOGRÁFICA	37
6	CONCLUSÃO	40
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Um assunto que vem sendo discutido cada vez mais no mundo todo é a geração de energia limpa. Isso devido ao grande impacto causado no meio ambiente pela utilização de energia através de combustíveis fósseis. Assim, alternativas vêm sendo discutidas, como a energia eólica, solar e a energia provinda de resíduos sólidos urbanos (RSU). A energia gerada através do RSU traz ainda como benefício uma melhora significativa no tratamento desses resíduos, uma vez que reduz o problema de quantidade e tratamento dos mesmos.

A geração e a gestão inadequada de resíduos sólidos urbanos são uma grande preocupação em todo o mundo. A crescente população e a urbanização acelerada resultam em um aumento significativo na quantidade de resíduos gerados, o que pode levar a impactos negativos na saúde pública e no meio ambiente. Os Resíduos sólidos urbanos (RSU) consistem principalmente de resíduos domésticos e comerciais. Segundo a Norma Brasileira NBR 10004 de 1987, esses resíduos são compostos principalmente de papel, papelão, plásticos, vidros, metais, têxteis, restos de comida e resíduos de jardins. Como tal, os resíduos contêm uma proporção elevada de materiais renováveis que podem ser utilizados para recuperação de energia ou para a produção de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Segundo dados obtidos na literatura, são gerados em todo o mundo a cada ano uma grande quantidade de RSU: cerca de 246 milhões de toneladas no EUA, 28 milhões de toneladas no Reino Unido e 40 milhões toneladas no Japão (WILLIAMS, 2005). O Banco Mundial espera que a geração mundial de RSU atinja 2,2 bilhões de toneladas até 2025. A estimativa no ano de 2014 de geração de RSU é de 1,3 bilhão de toneladas por ano (BERNARDI, 2014).

No Brasil, segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), em 2012 foram coletadas 183,5 mil toneladas de resíduos sólidos por dia, em 90% do total de domicílios, o que representa 98% das moradias urbanas, mas apenas 33% das rurais. A matéria orgânica representa 51,4% do lixo diário, e 31,9% é composto de material reciclável (alumínio, plásticos, papel, aço, metais e vidro).

De acordo com o estudo feito pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2012), os brasileiros geraram em 2010 cerca de 60,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), crescimento de 6,8% sobre 2009. Desses, quase 23 milhões de toneladas, ou 42,4%, foram depositadas em locais inadequados: lixões ou aterros controlados —onde o chorume, líquido originado pela decomposição, não é tratado e pode contaminar os lençóis d'água.

O RSU pode ser utilizado como fonte de energia por meio de alguns processos, como a incineração, pirólise, gaseificação, entre outros. Nesse trabalho é apresentado o processo de gaseificação. A gaseificação é uma tecnologia termoquímica que converte materiais carbonosos em um gás combustível chamado gás de síntese. A utilização de gás de síntese como fonte de energia apresenta algumas vantagens em relação a outros processos de

conversão de resíduos sólidos urbanos, como a incineração e o aterramento:

- Baixas emissões de poluentes: O gás de síntese produzido pela gaseificação é composto principalmente por hidrogênio e monóxido de carbono, que são gases combustíveis limpos, com baixas emissões de poluentes e gases de efeito estufa.
- Produção de energia renovável: A gaseificação pode transformar resíduos sólidos urbanos em uma fonte de energia renovável, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e promovendo a sustentabilidade energética.
- Eficiência energética: A gaseificação pode ser combinada com sistemas de cogeração, em que a energia térmica gerada pelo processo é utilizada para produzir eletricidade, aumentando a eficiência energética do processo.
- Recuperação de materiais valiosos: A gaseificação pode permitir a recuperação de materiais valiosos, como metais, a partir dos resíduos sólidos urbanos, reduzindo a necessidade de extração de recursos naturais.
- Redução do volume de resíduos: A gaseificação pode reduzir significativamente o volume de resíduos sólidos urbanos que precisam ser destinados a aterros sanitários, reduzindo assim os custos de transporte e eliminação de resíduos.

Em resumo, a gaseificação apresenta diversas vantagens em relação a outros processos de conversão de resíduos sólidos urbanos, tornando-se uma opção atraente para a geração de energia limpa e renovável.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade do processo de gaseificação como uma alternativa na gestão de resíduos e aproveitamento energético. Para isso, objetiva-se analisar a biomassa e o gás de síntese a partir dos métodos experimentais descritos.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Análise da composição dos resíduos;
- Análise termogravimétrica e calorimétrica das amostras;
- Produção de um gás de síntese a partir da mistura de amostras (blend);
- Determinação do poder calorífico do gás de síntese;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS - RSU

Este capítulo abordará de forma sucinta alguns conceitos básicos do que são resíduos sólidos urbanos, sua forma de descarte, tratamentos, gestão nacional e internacional e sua capacidade de geração de energia.

3.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos - Definição e Classificação

Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas (resíduos domiciliares) e os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana (resíduos de limpeza urbana). (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS - SINIR, 2021)

A Lei nº 14.026/2020 (Novo Marco Legal do Saneamento), que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, em seu art.3º diz que os resíduos originários de atividades comerciais, industriais e de serviços cuja responsabilidade pelo manejo não seja atribuída ao gerador pode, por decisão do poder público, ser considerado resíduo sólido urbano. (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS - SINIR, 2021)

Os resíduos sólidos são definidos como sendo aqueles encontrados nos estados sólido e semissólido que resultam de atividades da sociedade das seguintes origens: industrial, doméstica, comercial, hospitalar, agrícola, de serviços e de varrição. Qualquer lodo de sistema de tratamento de água, controle de poluição estão excluídos desta definição. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 10004, 2004).

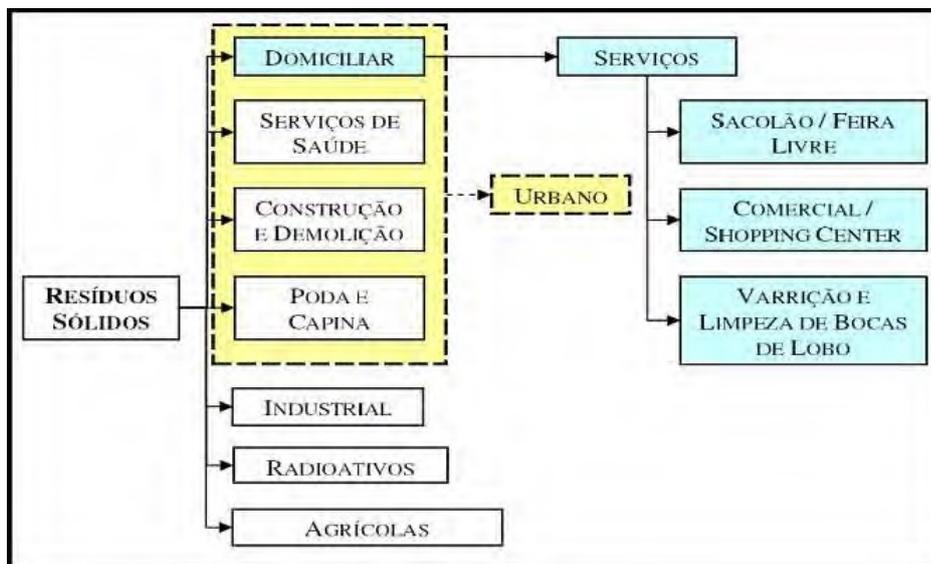
De um modo geral os resíduos podem ser classificados da seguinte maneira:

- Resíduos industriais (RI): oriundos dos rejeitos dos processos industriais e cuja responsabilidade de disposição é do gerador dos resíduos, isto é, as indústrias são responsáveis pelo descarte de seus resíduos (GRIPP, 1998).
- Resíduos sólidos urbanos (RSU): constituído pelos resíduos sólidos domiciliares (RSD) e os resíduos sólidos de serviços de saúde (RSS), e seu descarte é responsabilidade da administração pública (GRIPP, 1998).

No Brasil, o resíduo sólido é popularmente chamado de “lixo”, é o resíduo bruto, proveniente de qualquer fonte e descartado sem critério algum. Não há separação de lixo reciclável e não-reciclável, de material orgânico do inorgânico, ocasionando em mal cheiro e as vezes contaminando toda a região. Dessa forma, a grande maioria dos municípios brasileiros não dispõe de um tratamento adequado para o lixo.

Assim, temos na Figura 1 uma classificação de resíduos sólidos urbanos através de sua origem.

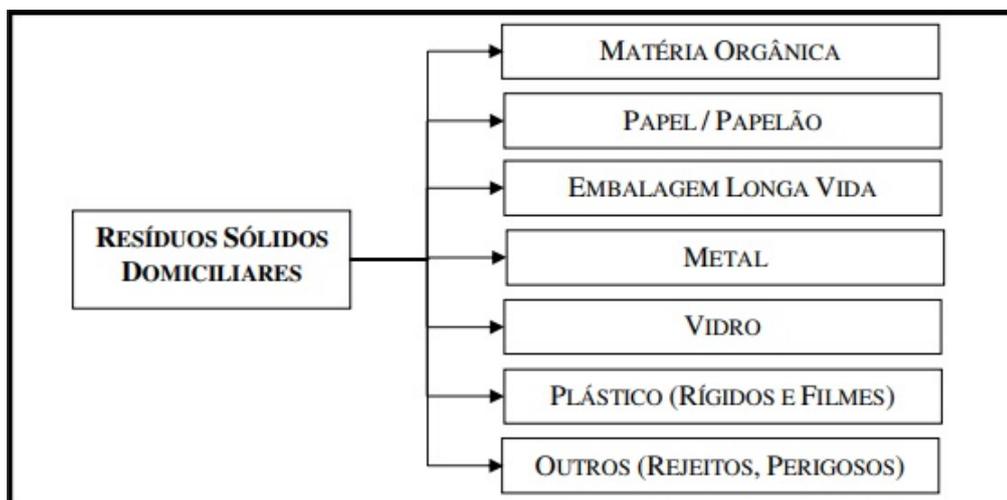
Figura 1 – Classificação dos resíduos sólidos em função da atividade de origem



Fonte: Mattos, 2005

É possível ainda classificarmos resíduos sólidos urbanos através de seu grupo de atividade, na Figura 2 consiste uma classificação genérica de resíduos sólidos domiciliares.

Figura 2 – Classificação dos resíduos sólidos domiciliares



Fonte: Mattos, 2005

3.1.2 Geração de RSU

A Figura 3 sintetiza informações sobre a geração de RSU no Brasil durante o ano de 2022, tendo alcançado um total de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas, o que corresponde a 224 mil toneladas diárias. Com isso, cada brasileiro produziu, em média, 1,043 kg de resíduos por dia. A partir dos dados registrados em 2022, observa-se que o montante de RSU gerado no país apresentou uma curva regressiva. As possíveis razões podem estar relacionadas às novas dinâmicas sociais, com a retomada da geração de resíduos nas empresas, escolas e escritórios, com a menor utilização dos serviços de delivery em comparação ao período de maior isolamento social e por conta da variação no poder de compra de parte da população. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE, 2022).

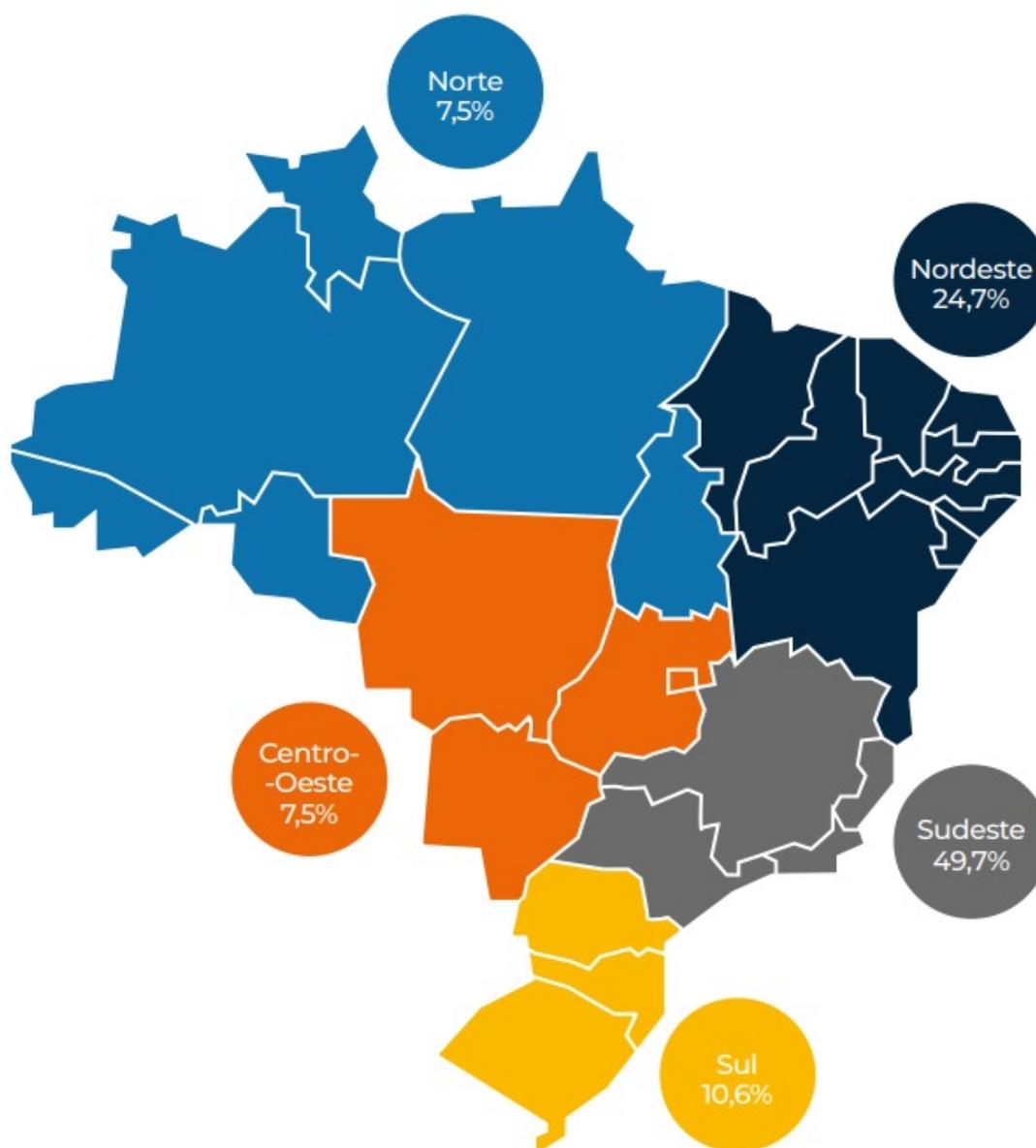
Figura 3 – Geração de RSU no Brasil em 2022



Fonte: ABRELPE, 2022

Regionalmente e nos moldes dos anos anteriores, a região com maior geração de resíduos continua sendo a Sudeste, com cerca de 111 mil toneladas diárias (aproximadamente 50% da geração do país) e uma média de 450 kg/hab/ano, enquanto a região Centro-Oeste representa pouco mais de 7% do total gerado, com cerca de 6 milhões de toneladas/ano, a menor dentre as regiões.

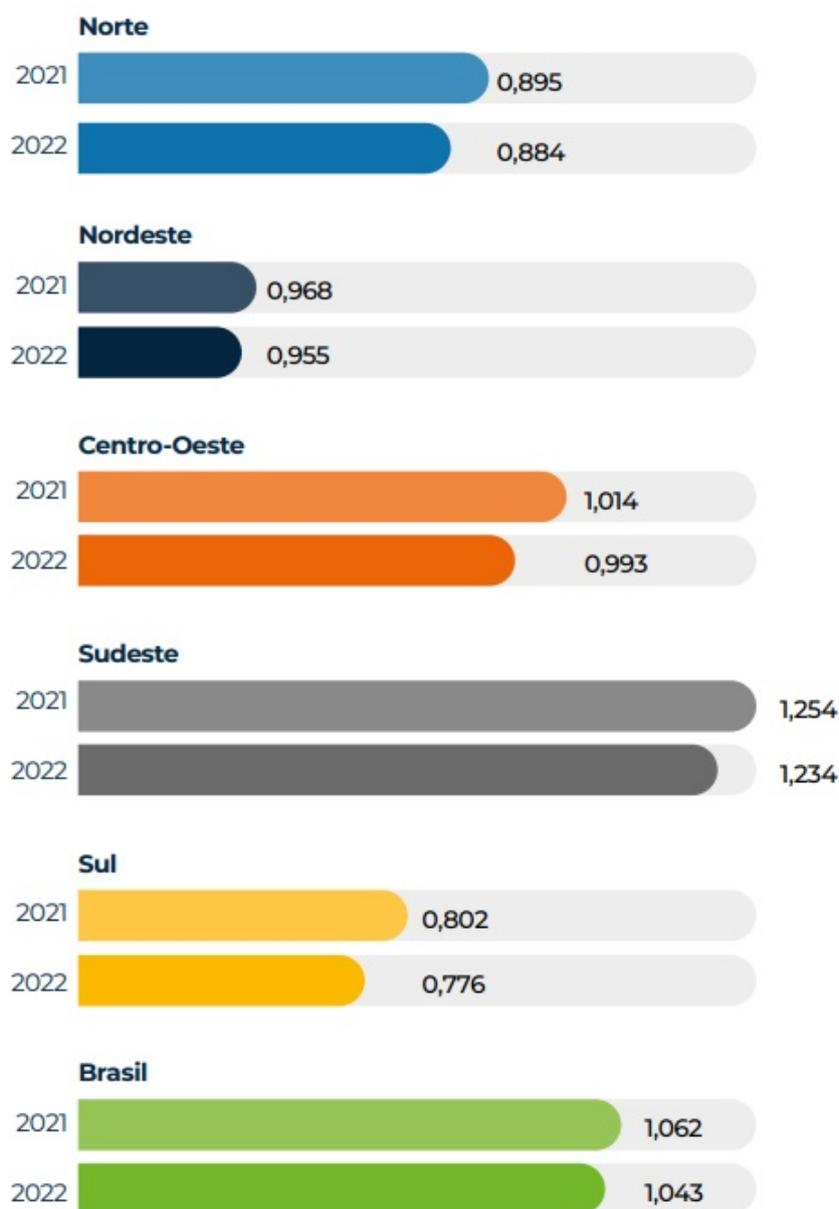
Figura 4 – Participação das regiões na geração de RSU (%) em 2022



Fonte: ABRELPE, 2022

Em termos de geração diária por habitante, as variações regionais mostram-se bastante latentes, com a região Sudeste apresentando uma geração média de 1,234 kg/hab/dia, a maior do país e, na outra ponta, a região Sul com uma média de 0,776 kg/hab/dia.

Figura 5 – Comparativo geração per capita entre 2021 e 2022



Fonte: ABRELPE, 2022

3.1.3 Coleta de RSU

Abordando a Coleta desses resíduos, foi registrado no país no ano de 2022 um total de 76,1 milhões de toneladas, ocasionando em uma cobertura de coleta de 93%. (ABRELPE, 2022)

Contudo, vale ressaltar, que algumas regiões do Brasil ainda apresentam índices abaixo da média nacional de cobertura, sendo estas regiões a Norte e a Nordeste, que se

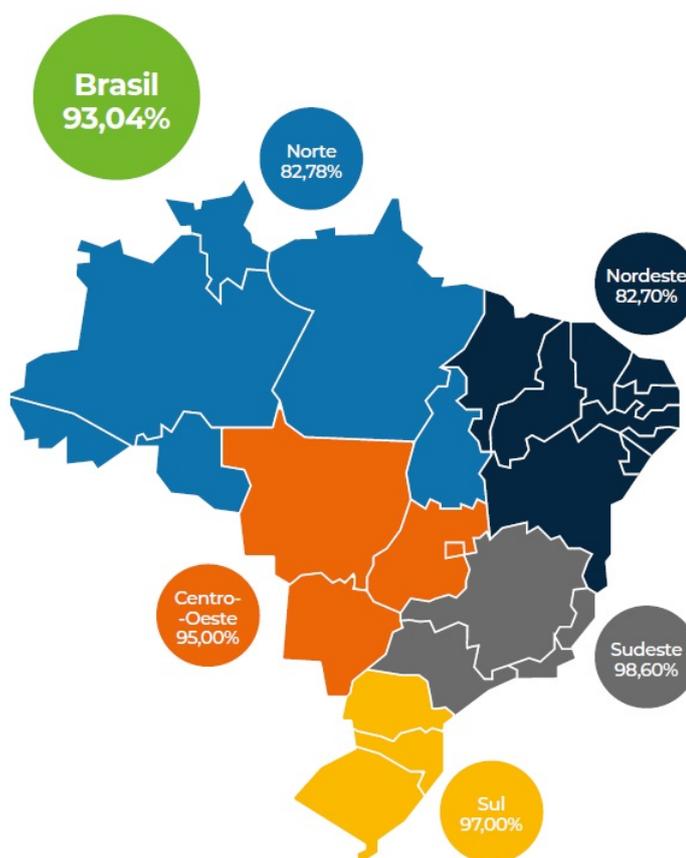
Figura 6 – Coleta de RSU no Brasil no ano de 2022



Fonte: ABRELPE, 2022

aproximam de 83%, como é mostrado na Figura 7.(ABRELPE, 2022)

Figura 7 – Índice cobertura de coleta de RSU no Brasil e Regiões em 2022



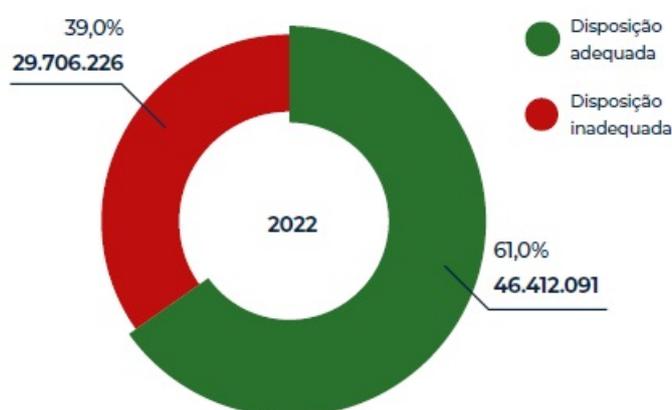
Fonte: ABRELPE, 2022

3.1.4 Destinação final do RSU

Um dos maiores problemas vivenciados hoje é a destinação final desses resíduos e sua inutilidade pós descarte. Desse modo é importante verificarmos como é feita essa destinação e se ela está adequada, seguindo a PNRS. (ABRELPE, 2022)

No Brasil, a maioria dos RSU coletados continua sendo encaminhada para aterros sanitários, aproximadamente 61% ou 46,4 milhões de toneladas, porém ainda existem 39% desses resíduos com destinações inadequadas ao meio ambiente. (ABRELPE, 2022)

Figura 8 – Disposição final RSU no ano de 2022.



Fonte: ABRELPE, 2022

Tabela 1 – Disposição final de RSU no Brasil e regiões, por tipo de destinação em 2022.

Região	Disposição adequada		Disposição inadequada	
	t/ano	%	t/ano	%
Norte	1.870.470,00	36,6	3.240.105,00	63,4
Nordeste	6.214.527,00	37,2	10.491.191,00	62,8
Centro-Oeste	2.532.762,00	43,5	3.288.281,00	56,5
Sudeste	29.773.638,00	74,3	10.298.552,00	25,7
Sul	6.020.694,00	71,6	2.388.097,00	28,4

Fonte: ABRELPE, 2022

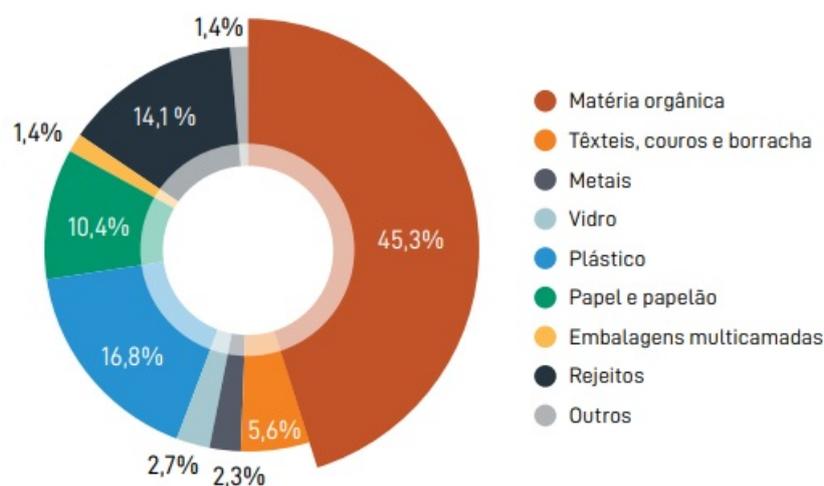
3.1.5 Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos refere-se à categorização dos tipos de materiais descartados pela população, e seu conhecimento é um passo fundamental para a gestão integrada e eficiente desses materiais. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE, 2020).

O conhecimento da composição dos resíduos sólidos permite o adequado planejamento do setor por meio de estratégias, políticas públicas e processos específicos que assegurem a destinação ambientalmente adequada preconizada pela PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos), levando-se em consideração as melhores alternativas disponíveis e aplicáveis, de acordo com os tipos e quantidades de resíduos existentes. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE, 2020). Dessa forma, um importante estudo que tem que ser feito é o estudo da caracterização e a análise dos componentes dos resíduos sólidos urbanos por parte dos órgãos públicos municipais, dessa forma, torna-se possível a melhor gestão, destinação e gerenciamento destes resíduos.

A gravimetria nacional foi estimada com base na média ponderada a partir da geração total de RSU por faixa de renda dos municípios e suas respectivas gravimetrias, levando-se em consideração a população e geração per capita. A partir da compilação dos dados disponíveis nos materiais consultados foi possível desenvolver uma comparação estatística e sua harmonização, que deu origem ao gráfico abaixo, contemplando as diferentes componentes e seus percentuais. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE, 2020)

Figura 9 – Gravimetria de resíduos sólidos urbanos.



Fonte: ABRELPE, 2020

Estima-se que praticamente metade da massa de RSU coletada no país seja composta de matéria orgânica. A outra metade é composta por resíduos recicláveis secos e rejeitos, o que aponta para uma grande oportunidade e para o necessário equacionamento do problema dos resíduos sólidos urbanos, mediante a adoção de práticas e medidas de valorização dos resíduos sólidos recicláveis secos e orgânicos, por meio, em especial, de arranjos regionalizados. (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO

DE RESÍDUOS SÓLIDOS - SINIR, 2021).

3.2 GESTÃO DE RSU

3.2.1 Aterros Sanitários

Com o intuito de armazenar os resíduos descartados em uma sociedade urbana, tentando manter o meio ambiente limpo, surgiram os aterros sanitários, que são uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário. (NBR-8419/92)

3.2.2 Incineração

Tecnicamente, (TILLMAN, 2012) , define a incineração como sendo a "destruição térmica de orgânicos através da combustão, ou seja, a oxidação a altas temperaturas". No âmbito do gerenciamento de resíduos sólidos, a incineração pode ser definida como um tratamento térmico efetuado em resíduos, no qual ocorre redução mássica e volumétrica (aproximadamente 75% e 90%, respectivamente), podendo ser utilizada para geração de energia (KORZUN; HECK, 1990).

O emprego desta técnica diminui a necessidade de áreas para disposição de resíduos, com conseqüente minimização dos custos de transporte e da degradação ambiental (especialmente dos recursos hídricos) provocada pelos aterros sanitários, além de oferecer a possibilidade de recuperação de energia via aproveitamento do conteúdo energético do lixo, contemplando assim a questão da recuperação do resíduo via reciclagem energética, para inserção em novo ciclo produtivo, conceito básico do desenvolvimento sustentável.

Apesar dessas vantagens, dúvidas sobre a viabilidade ambiental das usinas de incineração estão sendo levantadas em diversos países e instituições, em virtude da contaminação atmosférica associada à sua instalação e funcionamento. Além da emissão de gases ácidos, SO_x, NO_x e metais pesados, estudos têm constatado que a incineração de resíduos sólidos é uma das maiores fontes de dioxinas e furanos, um grupo de substâncias altamente tóxicas.

A geração desses subprodutos requer a utilização de filtros especiais, o que encarece significativamente uma usina de incineração. Por esse motivo, essas usinas são utilizadas em grandes centros urbanos, da ordem de 5 milhões de habitantes.

3.2.3 Pirólise

O processo denominado pirólise, ocorre em temperaturas relativamente mais baixas quando comparado à incineração, podendo variar entre 250 °C e 500 °C de acordo com

o tipo de produto que se deseja obter, e na total ausência de oxigênio. Os produtos da pirólise são o carvão, óleo pirolítico (ou bio-óleo), e um gás, composto por hidrogênio (H_2), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e metano (CH_4) (CHHITI; KEMIHA, 2013).

Pode ser definida também como o aquecimento de um combustível (RSU) a determinada taxa de aquecimento até atingir uma temperatura máxima, denominada temperatura de pirólise. Após atingir essa temperatura deve-se mantê-la por um tempo específico. O processo ocorre na total ausência de oxigênio (ou numa quantidade tão pequena que não permite ocorrer a gaseificação) e pode ou não ser realizado na presença de um gás mediador, como o nitrogênio. Este processo necessita de energia externa para ser iniciado, porém alguns de seus produtos como o carvão, que possui um alto valor energético, pode ser utilizado através da sua queima para fornecer energia para dar continuidade ao processo. Dependendo das condições de reação, ele produz diferentes quantidades de produtos sólidos, líquidos ou gasosos (BASU, 2010).

Durante a pirólise, a absorção de energia térmica do meio reacional excita ligações e ocasiona rompimento inicial das ligações mais fracas, seguindo-se da despolimerização das estruturas químicas que compõem a matéria-prima. Estas reações sequenciais iniciais, conhecidas como reações primárias, são responsáveis pela formação de voláteis, que, condensados, originam o bio-óleo, os gases não condensáveis e o carvão, este último que resulta de parte da matéria-prima que não se volatiliza. Com a permanência destes produtos gerados a elevadas temperaturas ocorrem novas reações denominadas secundárias que formam gases leves e outros compostos de menor massa molecular e o tamanho dessas partículas influenciam diretamente no produto final (PEREZ et al., 2004).

3.2.4 Gaseificação

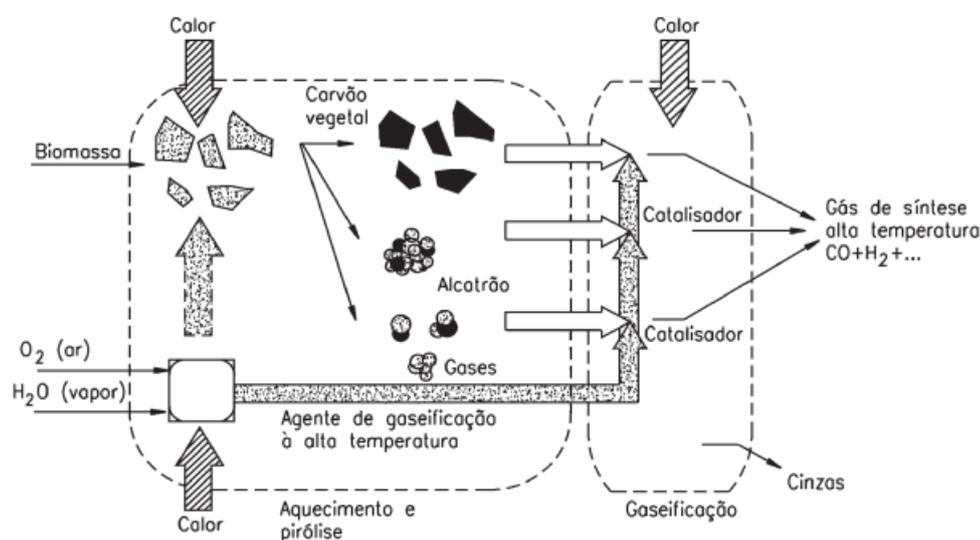
A gaseificação pode ser definida como o processo de conversão termoquímica de um material sólido ou líquido (que contém carbono na sua composição) em um combustível gasoso, através da oxidação parcial a temperaturas elevadas (reações termoquímicas numa faixa de temperaturas de 800 a 1.100 °C), e em pressões atmosféricas ou maiores, até 33 bar (CONAMA, s.d.). Utiliza-se um agente de gaseificação que pode ser ar, vapor de água, oxigênio ou uma mistura destes, em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão).

Segundo (WARNECKE, 2000), a gaseificação pode ser definida como um processo termoquímico localizado em uma região paramétrica entre a combustão e a pirólise. Neste sentido, este processo é entendido como o tratamento termoquímico que, diferentemente da combustão, não permite a oxidação completa do carbono e do hidrogênio presentes no combustível em CO_2 e H_2O , respectivamente, dando origem a compostos combustíveis, tais como CO , H_2 e CH_4 . Além dos gases mencionados anteriormente, o gás produzido também inclui produtos típicos de combustão: CO_2 , H_2O , O_2 (em quantidades mínimas)

e N_2 (quando o agente gaseificador é ar), assim como teores menores de hidrocarbonetos, tais como o eteno (C_2H_4), o etano (C_2H_6), entre outros.

A Figura 10 mostra um esquema das etapas do processo de gaseificação de biomassa. A pirólise constitui a primeira fase do processo, na qual se forma carvão vegetal, alcatrão e gases. Em paralelo, uma fração pequena da biomassa é oxidada, a fim de elevar a temperatura de reação até valores compreendidos entre 800 e 1.200 °C, dependendo principalmente da quantidade e do tipo de agente de gaseificação fornecido. Assim, é possível atingir o nível de temperatura adequado, tanto para o desenvolvimento da etapa de pirólise como para a gaseificação propriamente dita dos produtos gerados na pirólise.

Figura 10 – Exemplo de processo de gaseificação



Fonte: Reproduzida com permissão de Knoef (2002). Review of small-scale biomass gaseification. Pyrolysis and Gaseification of Biomass and Waste Expert Meeting, Strasbourg, France, 2002.

3.2.5 Gás de Síntese

O gás de síntese é uma mistura constituída de hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e outros hidrocarbonetos. Esse gás pode ser utilizado na geração de eletricidade, para a operação de células de combustíveis ou para produção de biocombustíveis e produtos químicos como metanol e gasolina (ARENA, 2012; LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2015; MATSAKAS et al., 2017).

Tanto a composição como a razão estequiométrica entre os componentes de um gás de síntese é variável devido a inúmeros fatores como: modelo do reator, forma de energia fornecida ao processo, tamanho das partículas, umidade do material de alimentação, tipo de matéria prima utilizada, temperatura e a relação entre o vapor e a matéria-prima (KOKALJ; ARBITER; SAMEC, 2017; MATSAKAS et al., 2017)

3.3 COMBUSTÃO

Todo material que pode ser queimado para liberar energia térmica é um combustível. A maioria dos combustíveis conhecidos são primariamente constituídos de hidrogênio e carbono. Eles são chamados de combustíveis de hidrocarbonetos e indicados pela fórmula geral C_nH_m . Os combustíveis de hidrocarbonetos existem em todas as fases, e entre eles estão o carvão, a gasolina e o gás natural.

Uma reação química durante a qual um combustível é oxidado e uma grande quantidade de energia é liberada é uma reação de combustão. Com frequência, por motivos óbvios, o oxidante mais usado nos processos de combustão é o ar - gratuito e amplamente disponível. Em mol ou em uma unidade de volume, o ar seco é composto de 20,9% de oxigênio, 78,1% de nitrogênio, 0,9% de argônio e pequenas quantidades de dióxido de carbono, hélio, neônio e hidrogênio. Na análise dos processos de combustão, o argônio do ar é tratado como nitrogênio e os gases que existem em quantidades muito pequenas são desconsiderados. Assim, a composição do ar seco pode ser aproximada para 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio em mols. Durante a combustão, o nitrogênio se comporta como um gás inerte e não reage com outros elementos.

Durante um processo de combustão, os componentes que existem antes da reação são chamados de reagentes, e os que existem após a reação são chamados de produtos. Citando como exemplo a Equação (1) que mostra a combustão de 1 kmol de carbono com 1 kmol de oxigênio puro. Nela, C e O_2 são reagentes, uma vez que existem antes da combustão, e o CO_2 é produto, uma vez que existe após a combustão. Um reagente não precisa reagir quimicamente na câmara de combustão. Se o carbono for queimado, por exemplo, em ar puro, ambos os lados da reação terão o N_2 .



As equações químicas são balanceadas com base no princípio da conservação de massa, que pode ser enunciado da seguinte maneira: a massa total de cada elemento é conservada durante uma reação química. Ou seja, a massa total de cada elemento no lado direito da equação (produtos) deve ser igual à massa total desse elemento no lado esquerdo (reagentes), embora os elementos existam em compostos químicos diferentes nos reagentes e produtos.

Um processo de combustão está completo quanto todo o carbono do combustível é transformado em CO_2 , todo o hidrogênio é transformado em H_2O e todo o enxofre (se houver) é transformado em SO_2 . Ou seja, todos os componentes que podem entrar em combustão de um combustível são consumidos até o final durante um processo completo de combustão. Da mesma forma, o processo de combustão é incompleto se os produtos da combustão contêm combustível não consumido, como C, H_2 , CO ou OH.

O oxigênio insuficiente é um motivo óbvio para a combustão incompleta, mas não

é o único. A combustão incompleta ocorre mesmo quando há mais oxigênio presente na câmara de combustão do que o oxigênio necessário para a combustão completa. Isso pode ser atribuído à mistura insuficiente na câmara de combustão durante o tempo limitado em que o combustível e o oxigênio estão em contato. Outra causa da combustão incompleta é a dissociação, que se torna importante em altas temperaturas. O oxigênio tem uma tendência muito maior de se combinar ao hidrogênio do que ao carbono. Assim, o hidrogênio do combustível normalmente queima até o final, formando o H_2O , mesmo quando há menos oxigênio do que o necessário para a completa combustão. Parte do carbono, porém, acaba como CO ou apenas como partículas simples de C (fuligem) nos produtos (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2006).

3.4 PODER CALORÍFICO

3.4.1 Entalpia

Na análise de determinados tipos de processo, particularmente na geração de potência e refrigeração, frequentemente encontramos a combinação das propriedades $u + Pv$. Para simplificar e tornar-se conveniente, essa combinação foi definida como uma nova propriedade, a entalpia, recebendo o símbolo de h . (ÇENGEL et al., 2012)

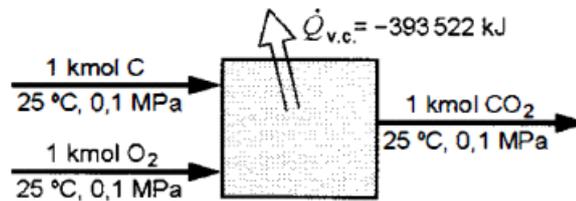
3.4.2 Entalpia de Formação e Entalpia de Combustão

A definição de entalpia de formação é dada como a entalpia de uma substância a uma temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$ e 101325 Pascal , ou seja, no estado de referência. Dessa forma, considerando um processo de combustão de carbono sólido com oxigênio gasoso (gás perfeito), entrando em um volume de controle no estado de referência, a formação do dióxido de carbono (gás perfeito), saindo do volume de controle também no estado de referência, a transferência de calor, se medida precisamente, resultaria na entalpia de formação do dióxido de carbono, como mostrado na Figura 11 (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2006).

Considerando os reagentes e os produtos em um mesmo estado, a variação da entalpia durante o processo ocorre exclusivamente devido às alterações da composição química do sistema. Essa variação de entalpia é diferente para diferentes reações, dessa forma, temos a entalpia de reação, definida como a diferença entre a entalpia dos produtos em um estado especificado e a entalpia dos reagentes no mesmo estado, para uma reação completa. Nos processos de combustão, a entalpia de reação é geralmente chamada de entalpia de combustão. Assim, tem-se:

$$h_R = h_C = H_{prod} - H_{reag} \quad (2)$$

Figura 11 – Exemplo de processo de combustão



Fonte: Imagem retirada do livro: "Fundamentos da Termodinâmica", WYLEN V., SONN-TAG, BORGNAKKE.

3.4.3 Poder calorífico inferior e Poder calorífico superior

Um outro termo muito utilizado em conjunto com a combustão é o poder calorífico do combustível, este é definido como a quantidade de calor liberada quando um combustível é queimado completamente em um processo de regime permanente, ou seja, o poder calorífico de um combustível é igual ao valor absoluto da entalpia de combustão do combustível. Ou seja:

$$P_c = |h_c| \quad (3)$$

Além disso, temos também o poder calorífico superior e inferior, dependendo do estado como a molécula de água sai nos produtos, ou seja, quando a molécula de água nos produtos está no estado líquido, o poder calorífico é chamado de poder calorífico superior (PCS), da mesma forma, quando a molécula de água nos produtos está na forma de vapor o poder calorífico é chamado então de poder calorífico inferior (PCI) (ÇENGEL et al., 2012).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a realização da pesquisa, foram analisadas quatro amostras de resíduos sólidos urbanos com características diferentes. As amostras foram denominadas de acordo com a localização da coleta e/ou característica, sendo: Feira Moída, Limpeza Blend Feira, Cavaco e Blend Peneirado. Na Figura 12 (a) é representada a amostra de Blend Peneirado, tanto na forma bruta, como foi feita a coleta, quanto após a moagem.

O primeiro passo foi a moagem dos quatro tipos de amostras a serem estudadas. A moagem é feita em um micro moinho do tipo Willye TE 640 como mostrado na Figura 12 (b).

Figura 12 – Moagem das amostras



(a) Amostra Blend Peneirado (b) Moinho Willye TE 640

Fonte: Autores, 2022

Após a moagem, as amostras foram distribuídas em oito recipientes, dos quais a metade seria colocada em uma mufla à 110°C por aproximadamente 7 dias, como mostrado na Figura 13 e a outra metade foi deixada à temperatura ambiente, resultando assim em quatro amostras secas e quatro úmidas, uma de cada tipo de resíduo.

Figura 13 – Mufla



Fonte: Autores, 2022

4.2 TERMOGRAVIMETRIA

Posteriormente, foi realizada a análise das amostras úmidas em um Analisador Termogravimétrico, mostrado nas Figuras 14 (a) e (b). Para essa análise, primeiramente foi feita a tara dos recipientes, em seguida, estes foram preenchidos com as amostras de resíduos, sendo três amostras úmidas de cada variedade como observado na Figura 14 (c). Após a pesagem feita pelo equipamento, a análise tem início, durando aproximadamente 24 horas. Dessa análise foram obtidos alguns dados, como a porcentagem de umidade, voláteis e cinzas de cada amostra.

Figura 14 – Analisador Termogravimétrico TGA-200A



(a) Analisador TGA-200A fechado (b) Analisador TGA-200A aberta (c) Analisador com amostras

Fonte: Autores, 2022

4.3 CALORÍMETRO

O próximo passo foi a verificação do poder calorífico de cada amostra. Para isso, foram realizados testes no Calorímetro, mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Calorímetro da marca IKA C200



Fonte: Autores, 2022

Para a realização do experimento foi feita a pesagem de um volume de amostra em uma balança analítica, Figura 16, e em seguida o recipiente foi colocado no Frasco de Decomposição, onde é realizada a combustão da biomassa em ambiente hermeticamente controlado.

A montagem e o acessório são mostrados, respectivamente, nas Figuras 17 (a) e (b). Após esse passo é colocada uma quantidade de 5 ml de água destilada no frasco - essa é uma recomendação do fabricante para a prolongação da vida útil do filamento que faz a queima.

A seguir é necessário preencher o frasco com oxigênio a uma pressão de 30 bar, na Estação de preenchimento de oxigênio, identificado na Figura 17 (c). Feito isso, basta colocar os dados de massa da amostra no equipamento e iniciar o experimento, aguardando o resultado.

Figura 16 – Balança Analítica



Fonte: Autores, 2022

Figura 17 – Montagem Calorímetro



(a) Montagem para a queima (b) Frasco de Decomposição (c) Estação de preenchimento de oxigênio

Fonte: Autores, 2022

4.4 GERAÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE

Para a obtenção do gás de síntese foi realizada a mistura de três das amostras, Cavaco, Feira Moída e Limpeza Blend Feira, e obtido um blend que foi utilizado no processo de Gaseificação. As amostras e respectivas quantidades de cada uma podem ser visualizadas na Tabela 2.

Antes de se obter o gás de síntese, é necessário preparar o blend de resíduos sólidos

Tabela 2 – Composição do Blend

Amostra	Massa [g]
Cavaco	50,77
Feira Moída	50,18
Limpeza Blend Feira	94,40
Total	195,35

urbanos, composto por amostras de cavaco e duas amostras de resíduos de diferentes feiras. Dessa forma, é possível obtermos o gás de síntese através da Gaseificação.

Figura 18 – Montagem do Reator



(a) Montagem do reator

(b) Reator dentro da mufla



(c) Montagem finalizada

Fonte: Autores, 2022

Para prepararmos o material, inicialmente é realizado a pesagem da mistura de resíduos. Após isso, o material é colocado dentro de um reator (cilindro metálico capaz

de suportar altas temperaturas), onde é realizado o processo de gaseificação. Na Figura 18, podemos ver o processo de montagem do reator.

O reator é então posicionado em uma mufla ajustada para atingir 850 °C em até 15 minutos, contudo, a gaseificação se inicia antes de atingir esta temperatura. Através do tubo de saída, foram coletadas duas amostras de gases, a primeira a uma temperatura de 460 °C e a outra a uma temperatura de 660 °C.

Os gases saem do reator através de uma chaminé, onde é posicionado um duto para reduzir a temperatura e proporcionar a coleta do gás de síntese. O gás passa por uma filtragem e por impingers contendo sílica gel para remoção de umidade residual, conforme mostrado na Figura 19, eliminando assim o alcatrão e outras impurezas formadas a baixas temperaturas. Após a filtragem, o gás foi armazenado em tedlar bags.

Figura 19 – Filtragem do Gás



(a) Bomba de Vácuo



(b) Sílica para filtragem



(c) Sistema de filtragem

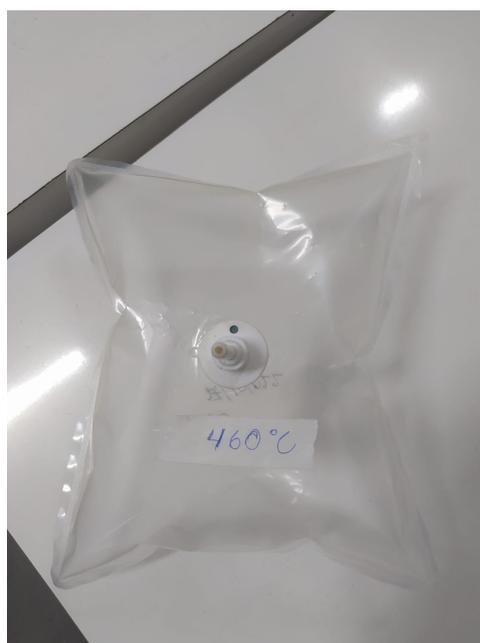


(d) Enchimento do Gás

Fonte: Autores, 2023

O Tedlar bag é um saco plástico especialmente desenvolvido para a coleta e amostragem de gases industriais, como mostrado na Figura 20. Eles são resistentes à permeação de gás para dentro ou fora e, dessa maneira, garantem a integridade da amostra. Além disso, é considerado flexível numa vasta faixa de temperatura, e por ser quimicamente inerte, não altera a composição de sua amostra e apresenta baixa permeabilidade (DIAS, 2023).

Figura 20 – Tedlar



Fonte: Autores, 2023

4.5 ANÁLISE CROMATOGRÁFICA

Após a obtenção dos gases, este é armazenado em um Tedlar. Para a análise, os gases são passados para o Cromatógrafo gasoso da marca Shimadzu modelo GC-2014, Figura 21.

Figura 21 – Cromatógrafo gasoso Shimadzu GC-2014



Fonte: Autores, 2023

A retirada do gás do tedlar é feita através de uma seringa, na qual é retirado 1 ml de gás que será inserido no cromatógrafo para análise, como é possível observar nas Figuras 22 (a) e (b).

Figura 22 – Processo de inserção no gás no cromatógrafo



(a) Extração do Gás do Tedlar (b) Inserção do gás no Cromatógrafo

Fonte: Autores, 2023

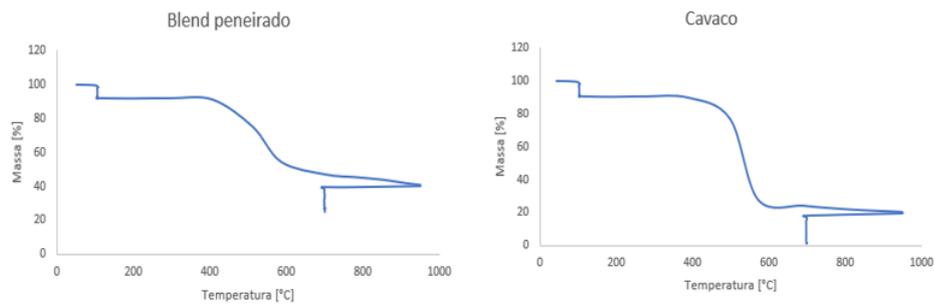
5 RESULTADOS

5.1 ANÁLISE DAS COMPOSIÇÕES

Com a termogravimetria foi possível analisar a degradação mássica do material em função da variação de temperatura. O experimento pode ser dividido em três etapas diferentes: a primeira que consiste na secagem do material, que vai da temperatura inicial até 105 °C; a segunda que é o aquecimento no qual é analisado o percentual de materiais voláteis, indo de 105 até a faixa dos 950 °C; e a última consiste na análise das cinzas, de 950 até os 700 °C, quando se permanece constante até o fim do experimento.

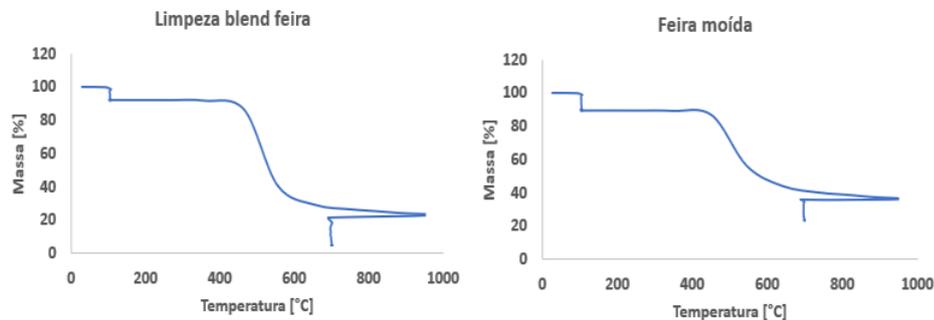
As curvas de degradação mássica em função da temperatura de cada amostra podem ser visualizadas a seguir:

Figura 23 – Curvas de degradação



Fonte: Autores, 2023

Figura 24 – Curvas de degradação



Fonte: Autores, 2023

Do equipamento, foram obtidos os dados referentes à quantidade de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo presentes em cada uma das amostras. Os dados obtidos são apresentados nas Tabelas a seguir:

Tabela 3 – Amostras Blend Peneirado e Cavaco

(a) Parâmetros da amostra Blend Peneirado

Parâmetro analisado	Média [%]	Desvio padrão [%]
Umidade	7,9298	0,2990
Voláteis	51,7934	3,1252
Cinzas	26,9947	4,2198
Carbono fixo	21,2119	1,1583

(b) Parâmetros da Amostra Cavaco

Parâmetro analisado	Média [%]	Desvio padrão [%]
Umidade	9,2338	0,0402
Voláteis	71,3937	0,7507
Cinzas	1,3515	0,2967
Carbono fixo	27,2554	0,7408

(c) Parâmetros da amostra Limpeza Blend Feira

Parâmetro analisado	Média [%]	Desvio padrão [%]
Umidade	7,8698	0,2016
Voláteis	69,7658	0,2289
Cinzas	4,5703	0,4934
Carbono fixo	25,6639	0,5889

(d) Parâmetros da amostra Feira Moída

Parâmetro analisado	Média [%]	Desvio padrão [%]
Umidade	10,6651	0,2224
Voláteis	53,6191	1,7845
Cinzas	23,2188	2,4173
Carbono fixo	23,1621	0,6377

Fonte: Autores, 2023

5.2 ANÁLISE CALORIMÉTRICA

Partindo da análise calorimétrica realizada, foi possível definir o poder calorífico superior das amostras secas e úmidas. Após a realização de três testes com cada amostra realizou-se a média e o desvio padrão para a validação do resultado, como apresentados nas Tabelas 4 e 5 a seguir.

Tabela 4 – Poder calorífico superior amostras úmidas

Amostra	Massa [g]	Poder Calorífico [MJ/kg]	Média [MJ/kg]	Desvio Padrão
Blend peneirado 1	1,066	14,611	14,265	0,488
Blend peneirado 2	1,107	14,477		
Blend peneirado 3	1,068	13,706		
Feira moída 1	0,853	15,869	16,305	0,381
Feira moída 2	0,894	16,472		
Feira moída 3	0,875	16,575		
Cavaco 1	0,733	18,337	18,399	0,053
Cavaco 2	0,672	18,432		
Cavaco 3	0,657	18,427		
Limpeza blend feira 1	0,509	19,628	19,255	0,427
Limpeza blend feira 2	0,653	18,790		
Limpeza blend feira 3	0,488	19,348		

Fonte: Autores, 2023

Tabela 5 – Poder calorífico superior amostras secas

Amostra	Massa [g]	Poder Calorífico [MJ/kg]	Média [MJ/kg]	Desvio Padrão
Blend peneirado 1	0,761	15,981	15,662	1,045
Blend peneirado 2	0,941	14,495		
Blend peneirado 3	0,728	16,510		
Feira moída 1	0,908	17,351	17,490	0,226
Feira moída 2	0,885	17,368		
Feira moída 3	1,009	17,751		
Cavaco 1	0,874	18,026	18,157	0,197
Cavaco 2	0,781	18,383		
Cavaco 3	0,843	18,061		
Limpeza blend feira 1	0,548	19,098	19,034	0,109
Limpeza blend feira 2	0,678	19,096		
Limpeza blend feira 3	0,649	18,908		

Fonte: Autores, 2023

É possível perceber nas Tabelas 4 e 5 as médias de cada amostra e o desvio padrão. Segundo (PESSOA FILHO et al., 2020), o Poder Calorífico Superior (PCS) é determinado conforme método prescrito na norma ABNT NBR 8633/1984 em uma bomba calorimétrica isoperibólico, com água a 18 °C, IKA WORKS C-200. De acordo com essa norma, o PCS de uma amostra é obtido pela média de no mínimo duas amostragens realizadas no calorímetro, cuja precisão deve ser de ± 20 kJ/kg. Ainda segundo a norma, em ensaios repetidos devem ser tolerados as seguintes diferenças máximas entre as determinações do PCS: 120 kJ/kg para ensaios executados no mesmo laboratório (repetibilidade) e 300 kJ/kg para ensaios executados em laboratórios diferentes (reprodutibilidade). Neste estudo, os ensaios foram realizados no mesmo laboratório usando a bomba de calorimetria apresentada na Fig. 15.

Diante do exposto na Tabela 5, verifica-se que apesar do desvio padrão estar acima

do previsto pela ABNT NBR 8633/1984, o poder calorífico superior obtido está dentro do previsto para os resíduos sólidos urbanos (de 14 a 17 MJ/kg – (INFUESTA et al., 2019)) e para o cavaco (19 MJ/kg – (ARANTES et al., 2014)). O alto desvio padrão pode ainda justificar o poder calorífico superior das amostras de cavaco e blend de feira secas estarem abaixo do valor das mesmas amostras com teor de umidade variando em torno de 9 a 7%, conforme indicado na Tabela 3.

5.3 ANÁLISE CROMATOGRÁFICA

A partir do experimento descrito no item 4.5, foram obtidos os dados de composição do Gás de Síntese, tanto para 460 °C quanto para 660 °C. A Tabela 6 a seguir identifica essas composições.

Tabela 6 – Composição em porcentagem de volume de cada componente presente no Gás de Síntese

Componente	Syngas 460 °C	Syngas 660 °C
Metano (CH ₄)	5,777	0,000
Etino (C ₂ H ₂)	0,211	0,248
Eteno (C ₂ H ₄)	0,611	0,094
Etano (C ₂ H ₆)	0,459	0,046
Propadieno (C ₃ H ₄)	0,084	0,103
Propino (C ₃ H ₄)	13,401	18,398
Propeno (C ₃ H ₆)	0,604	0,487
Propano (C ₃ H ₈)	0,383	0,390
Isobutano (C ₄ H ₁₀)	0,134	0,000
Butano (C ₄ H ₁₀)	0,053	0,000
Hidrogênio (H)	0,000	0,000
Oxigênio (O ₂)	1,471	3,357
Nitrogênio (N ₂)	27,848	56,216
Monóxido de Carbono (CO)	38,675	12,867
Dióxido de Carbono (CO ₂)	10,290	7,795
Soma	100,000	100,000

Fonte: Autores, 2023

Para a determinação do PCI, foram necessárias algumas informações dos componentes, como a massa molar e entalpia de formação de cada um. Esses valores são mostrados na Tabela 7.

Com todos esses dados obtidos, o próximo passo foi realizar o balanço estequiométrico para as reações de combustão dos gases nos dois casos. Usando o princípio da conservação de massa, que foi enunciado no Capítulo 3, foram realizados os cálculos devidos e os resultados são apresentados nas Tabelas 8(a) e 8(b), que tratam dos dados estequiométricos para o gás em 460 °C e 660 °C, respectivamente.

Tabela 7 – Massa molar e entalpia de formação de cada componente do syngas

Componente	Massa Molar [kg/kmol]	Entalpia de formação [kJ/kmol]
Metano (CH ₄)	16,0430	-74873
Etino (C ₂ H ₂)	26,0400	228179
Eteno (C ₂ H ₄)	28,0540	52467
Etano (C ₂ H ₆)	30,0700	-84740
Propadieno (C ₃ H ₄)	40,0330	192300
Propino (C ₃ H ₄)	40,0330	185400
Propeno (C ₃ H ₆)	42,0330	20430
Propano (C ₃ H ₈)	44,0330	-103900
Isobutano (C ₄ H ₁₀)	58,0440	-126200
Butano (C ₄ H ₁₀)	58,0440	-126200
Hidrogênio (H)	2,0000	0
Oxigênio (O ₂)	31,9980	0
Nitrogênio (N ₂)	28,0134	0
Monóxido de Carbono (CO)	28,0100	110527
Dióxido de Carbono (CO ₂)	44,0090	-393522

Fonte: (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2006)

Tabela 8 – Balanços estequiométricos

(a) Balanço estequiométrico 460°C

Balanço Estequiométrico	
Reagentes	
N	Componente
0,05777	Metano (CH ₄)
0,00211	Etino (C ₂ H ₂)
0,00611	Eteno (C ₂ H ₄)
0,00459	Etano (C ₂ H ₆)
0,00084	Propadieno (C ₃ H ₄)
0,13401	Propino (C ₃ H ₄)
0,00604	Propeno (C ₃ H ₆)
0,00383	Propano (C ₃ H ₈)
0,00134	Isobutano (C ₄ H ₁₀)
0,00053	Butano (C ₄ H ₁₀)
0,01471	Oxigênio (O ₂)
0,27848	Nitrogênio (N ₂)
0,38675	Monóxido de Carbono (CO)
0,1029	Dióxido de Carbono (CO ₂)
Produtos	
0,4561	Água (H ₂ O)
1,015	Dióxido de Carbono (CO ₂)

(b) Balanço Estequiométrico 660°C

Balanço Estequiométrico	
Reagentes	
N	Componente
0,0025	Etino (C ₂ H ₂)
0,0009	Eteno (C ₂ H ₄)
0,0005	Etano (C ₂ H ₆)
0,001	Propadieno (C ₃ H ₄)
0,1826	Propino (C ₃ H ₄)
0,0048	Propeno (C ₃ H ₆)
0,0039	Propano (C ₃ H ₈)
0,0333	Oxigênio (O ₂)
0,5654	Nitrogênio (N ₂)
0,1277	Monóxido de Carbono (CO)
0,0774	Dióxido de Carbono (CO ₂)
Produtos	
0,3917	Água (H ₂ O)
0,7958	Dióxido de Carbono (CO ₂)

Fonte: Autores, 2023

Após a realização do balanço estequiométrico, foi realizado o cálculo do PCI de cada gás de síntese. Para isso, a Equação (2) foi descrita da seguinte forma:

$$h_c = \sum N_p h_{f,c} - \sum N_r h_{f,r} \quad (4)$$

onde h_c é a entalpia de combustão, N o número de mols e h_f a entalpia de formação de cada componente.

Com isso, foi realizado o cálculo para todos os componentes do gás de síntese nos dois casos. Foram encontrados os valores para a entalpia de combustão, bem como o número de mols e a massa molar total para o cálculo do poder calorífico inferior do gás de síntese a cada nível de temperatura. Os dados obtidos foram dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Determinação do PCI das amostras

Propriedade\Syngás	460 °C	660 °C
Entalpia de combustão [kJ/kmol]	340054,113	328505
Massa Molar [kg/kmol]	30,8533	31,9546
PCI [kJ/kg]	11021,655	10348,5

Fonte: Autores, 2023

(FERREIRA et al., 2021) apresentaram resultados experimentais do PCI de gás síntese produzidos a partir da gaseificação de resíduos sólidos urbanos à 850°C. Segundo os autores o PCI varia de 14 a 18MJ/kg. Logo, considerando que a coleta realizada no presente trabalho foi realizada a baixas temperaturas, seria esperado menores valores para o PCI do gás de síntese. As curvas de termodegradação apresentadas nas Figuras 23 e 24 mostram que em temperaturas inferiores a 600 °C as biomassas ainda estão liberando materiais voláteis, e é a partir dessa liberação que ocorrem as reações termoquímicas que dão origem ao gás de síntese. Os maiores valores de poder calorífico são alcançados quando todos os voláteis são liberados, ou seja, em temperaturas de gaseificação superiores à 800 °C.

6 CONCLUSÃO

O trabalho em questão contou com muitas etapas e processos, desde a separação e moagem dos resíduos sólidos urbanos até a sua gaseificação e análise do gás de síntese. Com isso, foram utilizados diversos equipamentos como a mufla, o analisador termogravimétrico, o calorímetro, o reator e, por fim, o cromatógrafo. Devido a esse grande número de equipamentos e processos, esse foi um experimento de grande complexidade. Todos os processos necessitam de condições específicas bem controladas e definidas. Portanto, foi realizada a repetição de alguns testes para a obtenção de dados mais confiáveis.

Assim, usando os dados de poder calorífico da Tabela 4 e simulando a mesma composição mássica do blend utilizado no experimento, disposta na Tabela 2, foi realizado o cálculo do poder calorífico. Assim, foi obtido um valor de PCS para o que seria a biomassa a ser trabalhada, sendo de 18,27 MJ/kg. Observando os dados da Tabela 9, pode-se perceber, utilizando o gás de síntese de 660 °C como referência, que o valor do PCI teve uma redução de 43,36%. Essa redução é esperada, uma vez que o gás de síntese é um subproduto da biomassa e, além disso, devem ser consideradas perdas no processo, como as cinzas presentes e parte do gás que sofre condensação.

Ademais, pode-se concluir que os valores obtidos para o poder calorífico nessa composição de blend são satisfatórios e a gaseificação tem muito potencial para ser explorada e utilizada em maior escala como um método eficiente na gestão de resíduos sólidos urbanos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a conclusão deste trabalho, são apresentadas a seguir propostas para possíveis trabalhos futuros que possam dar continuidade a este:

- Validação dos dados apresentados neste trabalho com amostras recém coletadas para uma melhor distinção entre as amostras secas e úmidas
- Fazer a gaseificação de cada componente, e analisar separadamente a perda através do reator na geração do gás de síntese.
- Análise financeira da viabilidade da implementação destes métodos para a obtenção de energia elétrica.
- Viabilidade de utilização desse gás em motores do ciclo otto.

REFERÊNCIAS

- ARANTES, Danilo Campiom et al. Bagaço de cana-de-açúcar: análise térmica e energética de biomassa. Universidade Federal de Uberlândia, 2014.
- ARENA, Umberto. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. **Waste Management**, v. 32, n. 4, p. 625–639, 2012. Solid Waste Gasification. ISSN 0956-053X.
- BASU, Prabir. **Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory**. [S.l.]: Academic press, 2010.
- ÇENGEL, Yunus A et al. termodinâmica. Biblioteca Hernán Malo González, 2012.
- CHHITI, Younes; KEMIHA, Mohammed. Thermal conversion of biomass, pyrolysis and gasification. **International Journal of Engineering and Science (IJES)**, v. 2, n. 3, p. 75–85, 2013.
- CONAMA, RESOLUÇÃO CONAMA-nº. 316, de 29 de outubro de 2002-Publicada no DOU no 224, de 20 de novembro de 2002. **Seção**, v. 1, p. 92–95.
- FERREIRA, Cassius RN; INFIESTA, Luciano R; MONTEIRO, Vitor AL; STARLING, Maria Clara VM; SILVA JUNIOR, Washington M da; BORGES, Valerio L; CARVALHO, Solidônio R; TROVÓ, Alam G. Gasification of municipal refuse-derived fuel as an alternative to waste disposal: Process efficiency and thermochemical analysis. **Process Safety and Environmental Protection**, Elsevier, v. 149, p. 885–893, 2021.
- INFIESTA, Luciano R; FERREIRA, Cassius RN; TROVÓ, Alam G; BORGES, Valério L; CARVALHO, Solidônio R. Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel. **Journal of environmental management**, Elsevier, v. 236, p. 715–719, 2019.
- KOKALJ, Filip; ARBITER, Beno; SAMEC, Niko. Sewage sludge gasification as an alternative energy storage model. **Energy Conversion and Management**, v. 149, p. 738–747, 2017. ISSN 0196-8904.
- KORZUN, Edwin A; HECK, Howell H. Sources and fates of lead and cadmium in municipal solid waste. **Journal of the Air & Waste Management Association**, Taylor & Francis, v. 40, n. 9, p. 1220–1226, 1990.

LOMBARDI, Lidia; CARNEVALE, Ennio; CORTI, Andrea. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. **Waste Management**, v. 37, p. 26–44, 2015. Special Thematic Issue: Waste-to-Energy Processes and Technologies. ISSN 0956-053X.

MATSAKAS, Leonidas; GAO, Qiuju; JANSSON, Stina; ROVA, Ulrika; CHRISTAKOPOULOS, Paul. Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 26, p. 69–83, 2017. ISSN 0717-3458.

PEREZ, Juan Miguel Mesa et al. Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critérios para sua otimização. **Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola**, 2004.

PESSOA FILHO, José Silvio et al. Tratamento térmico para aproveitamento energético de resíduos plásticos: análise experimental. Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

TILLMAN, David A. **Incineration of municipal and hazardous solid wastes**. [S.l.]: Elsevier, 2012.

VAN WYLEN, Gordon J.; SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006. OCLC: 181902081. ISBN 9788521201359.

WARNECKE, Ragnar. Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier. **Biomass and bioenergy**, Elsevier, v. 18, n. 6, p. 489–497, 2000.