

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

**Avaliação do resíduo sólido urbano para
potencial elétrico da recuperação energética
de resíduo e mitigação de gases de efeito
estufa no distrito federal**

Autor: Alexandre Keiiti Moriya
Orientador: Prof. Dr. Augusto Cesar de Mendonca Brasil



Brasília, DF
Janeiro, 2024

Alexandre Keiti Moriya

Avaliação do resíduo sólido urbano para potencial elétrico da recuperação energética de resíduo e mitigação de gases de efeito estufa no distrito federal

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Augusto Cesar de Mendonca Brasil

Brasília, DF

Janeiro, 2024

Alexandre Keiiti Moriya

Avaliação do resíduo sólido urbano para potencial elétrico da recuperação energética de resíduo e mitigação de gases de efeito estufa no distrito federal/
Alexandre Keiiti Moriya. – Brasília, DF, Janeiro, 2024-
83 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Augusto Cesar de Mendonca Brasil

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , Janeiro, 2024.

1. . 2. . I. Prof. Dr. Augusto Cesar de Mendonca Brasil. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Avaliação do resíduo sólido urbano para potencial elétrico da recuperação energética de resíduo e mitigação de gases de efeito estufa no distrito federal

CDU

Alexandre Keiti Moriya

Avaliação do resíduo sólido urbano para potencial elétrico da recuperação energética de resíduo e mitigação de gases de efeito estufa no distrito federal

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 19 de janeiro de 2024:

Prof. Dr. Augusto Cesar de Mendonca
Brasil
Orientador

Prof. Dr. Fabio Alfaia da Cunha
Convidado 1

Prof. Dr. Juliana Petrocchi Rodrigues
Convidado 2

Brasília, DF
Janeiro, 2024

À todos que querem fazer do mundo um lugar divertido de se viver

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus e a minha família, especialmente a minha mãe, Alice Yoko Maruyama, e meu pai, Pedro Iochimi Moriya que sempre me incentivaram e me guiaram até aqui. Agradeço também aos meus amigos de antes e durante a faculdade, pois são com eles que eu muitas vezes acabo passando a maior parte do meu dia.

Agradeço também a minha sorte. Minha sorte de ter condições de passar por uma pandemia, sem maiores complicações familiares, e assistindo as aulas. Entendo que muitas pessoas não tiveram a mesma sorte, seja porque perdeu o emprego, teve que fechar seu negócio ou no pior dos casos uma vida foi perdida para a COVID.

Não posso não agradecer aos meus professores. As vezes, a diferença entre alguém desistir ou continuar a fazer uma faculdade de engenharia é o professor. Entre tantas matérias consideradas pesadelos para muitos, alguns professores conseguiram fazer com que a matéria fosse divertida e mais prazerosa.

Agradeço também aos meus orientadores de estágio. Ao todo foram 3. A Engenheira Civil, hoje Secretária Geral-Adjunta da ANEEL, Renata Farias que desde o primeiro momento senti nela um símbolo da força das mulheres dentro da engenharia, sempre firme e justa em suas decisões, broncas e elogios. Segundamente a Julia Bonfim, dona da GPR Consultoria, que graças a essa oportunidade pude ganhar outras experiências, em ciências contábeis e gestão empresarial. E o último dos orientadores, Yuri Schmitke e Rubens Aebi, presidente executivo e vice-presidente executivo da Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos, que me deram a oportunidade e acreditaram no meu potencial, me mostrando uma área em que eu nem imaginava que um engenheiro de energia poderia atuar, que é o de saneamento, no qual eu tirei a minha inspiração para esse trabalho. Claro, agradeço também a todos que fizeram parte e contribuíram para a minha formação profissional.

Por fim, gostaria de deixar registrado meus agradecimentos a algumas pes-

soas. Às amizades que fizeram parte do meu ensino fundamental e estão comigo até hoje, em especial João Gabriel Prego, Gabriel Totugui, Carlos Eduardo de Melo. E aos meus amigos que fiz pelo caminho da faculdade, Cláudio Correa, João Victor de Matos, Geraldo Victor, Renan Almeida, Mariana Martins, Caio Brandão, Amanda Henriques, Júlia Borges, Roberto Diniz, Pedro Prazeres, Lucas Pereira, Davi Dantas, Marcella Haack, João Vitor Garcia, Matheus Lobo, Kaique Borges, entre tantos outros que deixam-me boas lembranças, da minha vida escolar e acadêmica.

"Você pode planejar, criar e construir o lugar mais incrível do mundo, mas você vai precisar de pessoas que te ajudem a tornar esse sonho realidade."

(Walt Disney)

Resumo

Palavras-chaves: Recuperação energética, resíduo, energia, gestão de resíduos.

Este trabalho apresenta uma investigação sobre a recuperação energética, visando mensurar o potencial elétrico dos resíduos sólidos urbanos que há no Distrito Federal avaliando rotas tecnológicas que fazem a gestão dos resíduos e geram eletricidade, incineração com recuperação energética, gaseificação de resíduo sólido urbano e captura de gás de aterro para aproveitamento energético. A pesquisa foi conduzida realizando revisão da literatura em base de periódicos; mineração de dados sobre quantidade e tipo de resíduo, dados operacionais das tecnologias que serão abordadas, sobre a demanda energética do Distrito Federal e sobre as emissões de efeito estufa; e com o uso dos softwares LandGEM – para mensurar a produção de metano em aterro sanitário em Brasília – e Waste Reduction Mode (WARM) – para estimar o potencial de mitigação de gases de efeito estufa. Os resultados apontam que o Distrito Federal pode se beneficiar de duas formas com a recuperação energética: energia elétrica local para a população e mitigação de gases poluentes de efeito estufa. Essas descobertas são significativas para o setor de resíduo no Brasil e especialmente para o Distrito Federal, contribuindo com referências, dados e as discussões apresentadas. Apesar de faltar alguns aspectos como viabilidade econômica e estudos mais aprofundados e recentes sobre a gravimetria dos resíduos, este estudo fornece insights valiosos sobre recuperação energética, tema este que é recente no cenário no brasileiro podendo ser replicado para outros locais.

Abstract

Key-words: Waste-to-energy; waste; energy; waste management

This work presents an investigation into energy recovery, with the aim of measuring the electrical potential of the solid urban waste found in the Federal District by evaluating technological routes that manage waste and generate electricity, incineration with energy recovery, gasification of solid urban waste and capture of landfill gas for energy use. The research was conducted by reviewing the literature in periodicals; mining data on the quantity and type of waste, operational data on the technologies to be addressed, the Federal District's energy demand and greenhouse gas emissions; and using LandGEM software - to measure methane production in landfills in Brasilia - and Waste Reduction Mode (WARM) - to estimate the potential for mitigating greenhouse gases. The results show that the Federal District can benefit in two ways from energy recovery: local electricity for the population and mitigation of greenhouse gas pollutants. These findings are significant for the waste sector in Brazil and especially for the Federal District, contributing with references, data and the discussions presented. Despite lacking some aspects such as economic viability and more in-depth and recent studies on the gravimetry of waste, this study provides valuable insights into energy recovery, a topic that is recent on the Brazilian scene.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Hieraquia de resíduos	16
Figura 2 – Métodos de destinação de resíduos por nível de renda e por região	17
Figura 3 – Metas do setor de resíduos para curto, médio e longo prazo de potência instalada provenientes de sistemas de tratamento térmico	18
Figura 4 – Metas do setor de resíduos para curto, médio e longo prazo de Percentual da massa total recuperada por região	19
Figura 5 – Panorama mundial de plantas de Recuperação energética	25
Figura 6 – Processos de uma planta de incineração de resíduos	27
Figura 7 – Representação esquemática dos estágios de pirólise, gaseificação e combustão.	30
Figura 8 – Esquemático de um aterro com sistema de tratamento de biogás	31
Figura 9 – Disposição e destinação dos RSU no DF em 2019	35
Figura 10 – Composição da reciclagem em Brasília	37
Figura 11 – Procedimentos da Revisão de Literatura	39
Figura 12 – Estudos ao longo do tempo com as palavras chaves waste-to- energy AND energy recovery	41
Figura 13 – Estudos ao longo do tempo com as palavras chaves waste-to- energy AND waste management	42
Figura 14 – Estudos ao longo do tempo com as palavras chaves biogas AND energy recovery	42
Figura 15 – Estudos ao longo do tempo com as palavras chaves biogas AND waste management	43
Figura 16 – Estudos ao longo do tempo com as palavras chaves gasification AND energy recovery	43
Figura 17 – Estudos ao longo do tempo com as palavras chaves gasification AND waste management	44
Figura 18 – Nuvem de palavras da revisão da literatura	45
Figura 19 – Tela de recebimento de dados de entrada do LandGEM	51
Figura 20 – Tela de saída com a produção de metano por ano	53

Figura 21 – Tela de recebimento de dados de entrada do WARM	63
Figura 22 – Perguntas 5 e 7 do questionário do WARM para o cenário base 1	64
Figura 23 – Perguntas 5 e 6a do questionário do WARM para o cenário base 1	64
Figura 24 – Tela de resultados do Warm	66
Figura 25 – Potencial atendimento de demanda elétrica do DF com o uso do potencial elétrico dos resíduos sólidos urbanos	68
Figura 26 – Potencial de mitigação de gases de efeito estufa no setor de resíduos no DF	71
Figura 27 – Emissões de gases de efeito no DF	72

Lista de abreviaturas e siglas

ADASA	Agência Reguladoras de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
ASB	Aterro Sanitário de Brasília
CDR	combustível derivado de resíduos
GEE	gases de efeito estufa
NMOC	Compostos Orgânicos Não-metânicos
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
Planares	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	resíduo sólido urbano
SBCE	Sistema Brasileiro do Comércio de Emissões
SLU	Serviço de Limpeza Urbana
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
TEMAC	Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado
WARM	<i>Waste Reduction Model</i>
WtE	<i>Waste-to-Energy</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVO	21
2.1	Objetivo Geral	21
2.2	Objetivos específicos	21
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
3.1	Resíduos Sólidos Urbanos	22
3.2	Tecnologias estudadas	23
3.2.1	Incineração com recuperação energética	26
3.2.2	Gaseificação	28
3.2.3	Caputra do Biogás	31
3.2.4	Gases de efeito estufa	32
4	OBJETO DE ESTUDO	34
4.1	Local de Estudo	34
4.1.1	Resíduo de Brasília	34
5	METODOLOGIA	38
5.1	Revisão Sistemática de Literatura	38
5.1.1	Etapa 1: Panejamento	39
5.1.1.1	Etapa 1.1: Identificar a necessidade de revisão	39
5.1.1.2	Etapa 1.2: Elaborar a proposta de revisão	39
5.1.1.3	Etapa 1.3: Desenvolver protocolo de revisão	40
5.1.2	Etapa 2: Pesquisa	40
5.1.2.1	Etapa 2.1: Evolução do Tema	40
5.1.2.1.1	Etapa 2.1.1 Coleta de dados para a alimentação da base de artigos	40
5.1.2.1.2	Etapa 2.1.2: Análise das palavra-chave	44
5.1.2.1.3	Análise dos artigos	45
5.1.2.1.4	Etapa 2.2 Seleção de estudos	47

5.2	Combustível de resíduo	49
5.2.1	Produção de metano	50
5.2.1.1	LandGEM	50
5.3	Potencial elétrico do resíduo sólido urbano	54
5.3.1	Potência térmica	54
5.3.2	Energia térmica	54
5.3.3	Potência elétrica	55
5.3.4	Energia elétrica	55
5.3.4.1	Seleção da composição de um combustível derivado de resíduo para gaseificação	57
5.3.5	Eficiência elétrica líquida	57
5.3.5.1	Eficiência para Incineração de RSU	57
5.3.5.2	Eficiência para gaseificação de RSU	58
5.3.5.3	Eficiência para Gás de aterro	59
5.4	Potencial Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) dos resíduos utilizando o WARM	60
5.4.1	Cenários para o WARM	63
5.4.1.1	Cenário base	63
5.4.1.2	Cenário alternativo	65
5.4.2	Dados de Saída	65
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
6.1	Potencial Elétrico do RSU em Brasília	67
6.2	Tratamento de resíduos	69
6.3	Potencial de mitigação de gases de efeito estufa do setor de resíduos	70
7	CONSIDERAÇÃO FINAIS	73
8	CONCLUSÃO	74
	REFERÊNCIAS	77

1 Introdução

Quanto mais pessoas existirem no mundo, maior será a quantidade dos resíduos que serão produzidos. Há de se pensar como lidar com todo esse resíduo. Para efeito de comparação, de 2016 a 2050, a geração de resíduos passou de 2,6 bilhões de toneladas para 3.4 bilhões de toneladas Kaza2018.

Surge então o conceito de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos. De acordo com a Lei N^o 12.305 de 2 de agosto de 2010 que institui a política nacional de resíduos sólidos, a gestão integrada de resíduos é um:

"[...] conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável"(BRASIL, 2010)

Como há uma grande quantidade e variedade de resíduos , existem vários tipos de destinação. A diretiva europeia 1975/442/CEE traz o conceito de “hierarquia de resíduos”, definindo o grau de importância das ações para a gestão dos resíduos. Por ordem decrescente de importância: prevenir, reduzir, reutilizar, reciclar, recuperação energética e, por último, disposição. Veja a Figura 1:



Figura 1 – Hierarquia de resíduos

Fonte: [GUARULHOS \(2023\)](#)

No Brasil, a hierarquia foi instituída na Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Contudo, grande parte dos resíduos ainda são direcionados para a base da pirâmide, a disposição final. A Figura 1 mostra as formas que as diversas partes do mundo destinam o seu lixo.

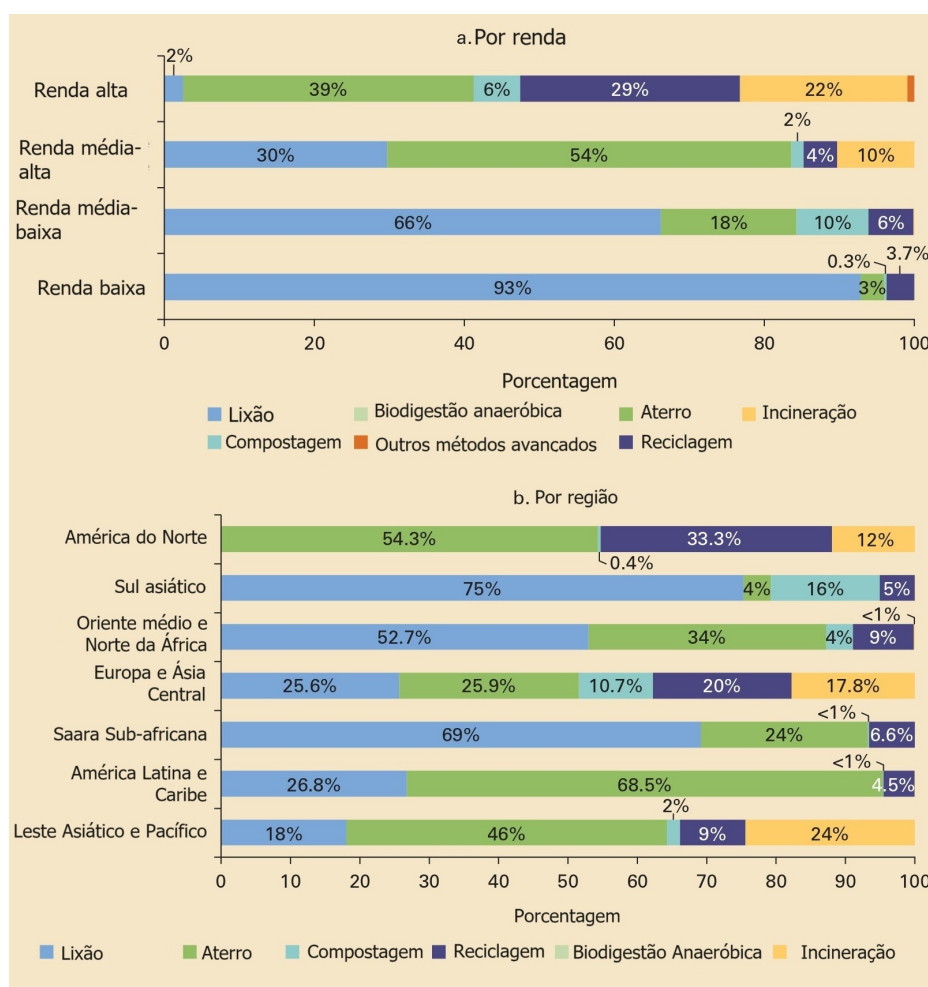


Figura 2 – Métodos de destinação de resíduos por nível de renda e por região

Fonte: KAZA et al. (2018) e traduzida pelo autor

Podemos ver diversas formas de tratar o lixo e um padrão de acordo com a renda do país. Países menos desenvolvidos utilizam em sua grande maioria lixões e aterros sanitários, como é na América do Sul e na África. Em países mais desenvolvidos, como na Europa, América do Norte e na Ásia, soluções mais caras são adotadas, como é o caso da incineração com recuperação energética e a reciclagem.

Curiosamente, nas regiões com altas taxas de reciclagem, também apresentam altas taxas de incineração e ambas são baixas quando há taxas mais altas de lixões e aterros.

De acordo com o Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS), em 2020, o Brasil se encontra com cerca de 98% do resíduo sólido urbano (RSU) sendo disposto no solo (Aterro Sanitário, Aterro Controlado e Lixão) e apenas 2% são reciclados (BRASIL, 2023).

Como forma de se incentivar a criar políticas públicas, em 2022 foi instituído o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) que tem o objetivo de elaborar estratégias para se cumprir a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305/2010, regulamentada pelo decreto 10.936/2022 (BRASIL, 2022).

Diante o que foi exposto, metas a curto, médio e longo prazo foram criadas para orientar o gestor público e assim ele possa tomar as suas decisões. Destas metas, pode-se destacar a meta 9 e ela orienta a “aumentar a recuperação e aproveitamento energético por meio de tratamento térmico de RSU.” (BRASIL, 2022). Como pode-se ver na Figura 3.

	2020	2024	2028	2032	2036	2040
Brasil	0	311	462	626	804	994

Figura 3 – Metas do setor de resíduos para curto, médio e longo prazo de potência instalada provenientes de sistemas de tratamento térmico

Fonte: BRASIL (2022)

Até o momento, não foi encontrado nenhuma planta que trate termicamente o resíduo e gere eletricidade no Brasil. No entanto, é comum a captura de biogás em aterros sanitários, cujo a potência instalada de forma centralizada já chega a 234,5 MW (ANEEL, 2023).

Outra meta a ser enfatizada no PLANARES, a meta número 4, trata sobre desvio de resíduo que é disposta em aterros. Veja na 4 a meta de desvio em percentual por região.

REGIÃO/ANO	2020	2024	2028	2032	2036	2040
Norte	1,2%	15,3%	18%	20,7%	23,5%	26,2%
Nordeste	1,6%	11,3%	15,1%	18,9%	22,8%	26,6%
Centro-Oeste	1,9%	13,4%	18,5%	23,6%	28,8%	33,9%
Sudeste	1,9%	14,3%	26,7%	39,1%	51,5%	63,9%
Sul	4,7%	17,1%	29,5%	41,9%	54,3%	66,7%
Brasil	2,2%	13,8%	22,4%	31%	39,6%	48,1%

Figura 4 – Metas do setor de resíduos para curto, médio e longo prazo de Percentual da massa total recuperada por região

Fonte: BRASIL (2022)

Logo, há uma orientação expressa de se planejar rotas alternativas aos aterros para que mais de 1/3 dos resíduos até 2040 tenha outras destinações.

Devido ao volume de lixo esperado e priorizando a diminuição de resíduos sendo dispostos em aterros ou lixões, a recuperação energética (Waste-to-Energy ou WtE) pode ser uma opção sustentável para destinação final dos RSU, desviando resíduos dos aterros sanitários.

Além disso, tratar o resíduo faz parte dos serviços de saneamento, um direito reconhecido pela ONU em 2010 (ONU, 2010). O novo marco do Saneamento, instituída pela Lei 14.026 de 2020 (BRASIL, 2020), reforça a importância que tem os resíduos para a universalização do saneamento. Pelo lado da saúde pública, de acordo com o Ministério da Saúde, uma boa gestão integrada de resíduos diminui a incidência de casos de peste, dengue e febre amarela.

No entanto, as novas tecnologias precisam ser planejadas de forma que o seu impacto ambiental seja o menor possível. O setor de resíduos por sua vez é responsável por boa parte das emissões de gases de efeito estufa, cerca de 30% das emissões equivalentes do Brasil. Isso deve-se ao fato do resíduo orgânico que ao passar pelo processo de putrefação, acaba emitindo o gás metano, um gás mais potente que o gás carbônico para o aquecimento global.

A tecnologia de WtE pode ser inovadora para o Brasil, no mundo, ela já se encontra muito bem consolidada. Existem mais de 2.500 plantas operando (ECOPROG, 2023)., sendo grande parte instalada na Europa e principalmente na Ásia (KAZA et al., 2018). O seu grande diferencial é que ao mesmo tempo em que

o resíduo é tratado, também é aproveitado o calor contido naquele resíduo, para gerar eletricidade ou para consumo térmico.

Essa energia pode ser considerada limpa e, pela fração orgânica, renovável, desde que seja seguido os limites de emissões nas instalações da usina WtE, implementando tecnologias de controle de poluição atmosférica. Isso se alinha com os propósitos da transição energética, modelo em que se busca a menor utilização da energia fóssil e a diminuição dos impactos negativos ambientais.

Nesse sentido, no Brasil alguns estudos estão sendo desenvolvidos para a implementação das tecnologias de WtE. Em Brasília, capital do Brasil, há planos de se instalar a captura do gás de aterro no Aterro Sanitário de Brasília (ASB) e implementar um Ecoparque com a inclusão de uma usina de tratamento térmico (incineração) de resíduos (SEPE, 2021b; SEPE, 2021a).

Tomando como inspiração estes projetos, a proposta do presente trabalho é estimar o potencial elétrico do Resíduo Sólido Urbano dentro de uma gestão sustentável e integrada de resíduos, além de avaliar a mitigação de gases de efeito estufa na região local.

Espera-se que este trabalho possa contribuir com dados e referências para projetos atuais, principalmente o de Brasília, e outros futuros, podendo ser replicado para outras regiões no Brasil. E, também, fazer uma provocação aos leitores, especialmente aos tomadores de decisão: o resíduo que é um problema, pode ser uma solução.

2 Objetivo

2.1 Objetivo Geral

Estimar o potencial de energia elétrica que o resíduo sólido urbano possui para Brasília, Distrito Federal, e avaliar a possibilidade de mitigação de gases de efeito estufa.

2.2 Objetivos específicos

1. Realizar levantamento bibliográfico sobre gestão de resíduos sólidos urbanos e sobre as rotas tecnológicas existentes;
2. Coletar dados sobre gravimetria e quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados anualmente em Brasília, Distrito Federal;
3. Estimar a quantidade de energia possível de ser obtida;
4. Avaliar a relevância desta energia elétrica para Brasília;
5. Estimar o potencial de mitigação dos gases de efeito estufa;
6. Coletar dados sobre as emissões atuais do setor de resíduos sólidos urbanos e das tecnologias estudadas e compará-las;
7. Propor estratégias para melhorar a gestão de resíduo sólidos de Brasília.

3 Fundamentação Teórica

3.1 Resíduos Sólidos Urbanos

A gestão de resíduos é uma questão complexa, não apenas devido a grande quantidade gerada, mas também pela sua diversidade. Para facilitar o entendimento será delimitado e explicado sobre qual tipo de resíduo será abordado nas análises.

Deste modo, existem algumas formas de dividirmos os resíduos:

Tabela 1 – Classificação de Resíduos

Critério de Classificação	Tipo de Resíduo
Quanto à Origem	Resíduos domiciliares Resíduos de limpeza urbana; Resíduos sólidos urbanos; Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços; Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico; Resíduos industriais; Resíduos de serviços de saúde; Resíduos da construção civil; Resíduos agrossilvopastoris; Resíduos de serviços de transportes; Resíduos de mineração;
Quanto à periculosidade	Resíduo perigoso; Resíduo não-perigoso;

Fonte: [SINIR+ \(2023\)](#)

Sobre o Resíduo Sólido Urbano:

“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)” (SINIR+, 2023)

Além disso:

“A Lei nº 14.026/2020 (Novo Marco Legal do Saneamento), que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, em seu art. 3º-C 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” (SINIR+, 2023).

Define-se, então, o resíduo sólido urbano o tipo de resíduo a ser objeto de estudo, devido a sua abrangência entre tipos, quantidade de dados disponíveis e relevância quantitativa para a gestão de resíduos.

3.2 Tecnologias estudadas

Entre as tecnologias encontradas existem algumas diferenças, principalmente nos seus requisitos operacionais e os produtos que cada tratamento resulta. Veja na Tabela 2.

Tabela 2 – Típicas Condições de reação e produtos dos processos de tratamento térmico

Parâmetros	Incineração	Pirólise	Gasificação
Princípio	Combustão Completa	Degradação térmica de material orgânico na ausência de oxigênio	Oxidação Parcial
Temperatura de Operação (°C)	850 – 1200	400 – 800	800 – 1600
Atmosfera	Presença de Oxigênio Suficiente	Ausência de Oxigênio	Suprimento de oxigênio controlada
Produtos Sólidos	Cinzas residuais, cinzas volantes, escórias, outras substâncias não combustíveis como metais e vidro	Cinzas, carvão (combinação de não combustível e carbono)	Cinzas, escória
Produtos Líquidos	Não há	Condensado de gás de pirólise (óleo de pirólise, cera, alcatrão)	Não há
Produtos Gasosos	CO_2 , H_2O , O_2 , N_2	Gás de pirólise (H_2 , CO , hidrocarbonetos, H_2 , O , N_2)	Gás de síntese (H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , H_2O , N_2)
Pré-tratamento	Não é necessário	Obrigatório	Obrigatório
RSU Bruto	Geralmente Preferido	Geralmente não preferido	Geralmente não preferido

Fonte: Elaborado pelo autor.

Note que a incineração é o único processo que não precisa de um pré-tratamento dos resíduos, logo sua operação é mais simples, o que pode explicar a sua alta adesão comparada às alternativas.

A adoção dessa tecnologia se deve fortemente pela possibilidade redução de gases de efeito estufa que ela oferece em dois cenários. Menor emissões quando usado como combustível comparando com carvão, gás natural e petróleo; e devido a recuperação energética desviar resíduos de aterros, acaba mitigando gases de efeito estufa que neles são gerados como metano, gás carbônico, amônia, entre outros (PSOMOPOULOS; BOURKA; THEMELIS, 2009).

Até 2020, existiam 2448 plantas de Recuperação energética ao redor do mundo (SCHMITKE, 2022). Veja Figura 5

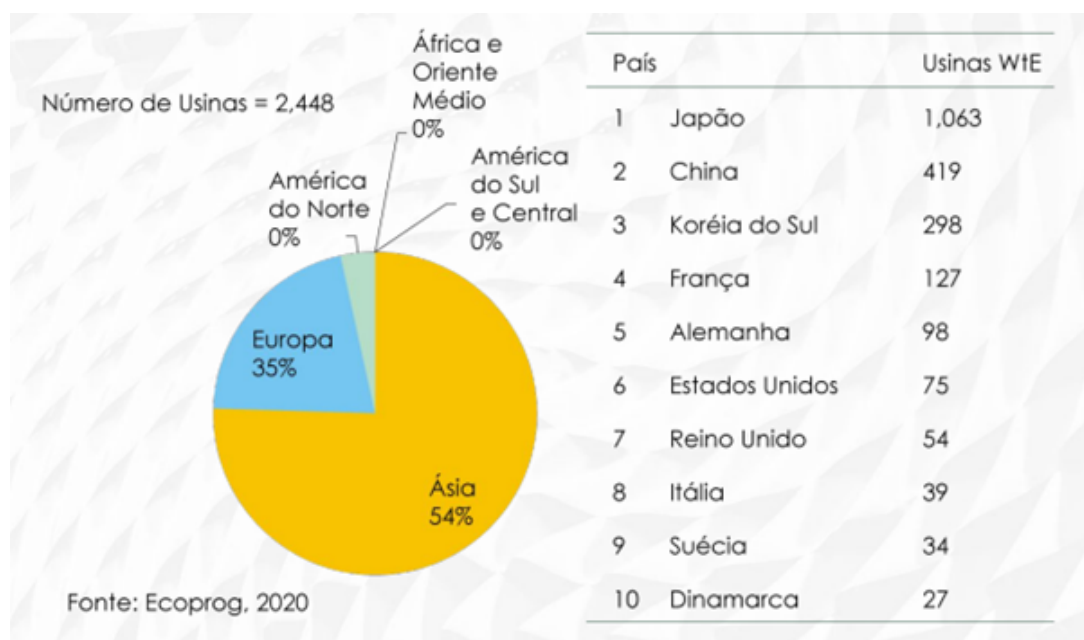


Figura 5 – Panorama mundial de plantas de Recuperação energética

Fonte: SCHMITKE (2023) com dados do Ecoprog de 2020

A Ásia lidera essa tecnologia no mundo, possuindo mais da metade das plantas em operação do mundo, enquanto a Europa vem logo atrás com boa representatividade. Dessa tecnologia, mais de 90% dos casos são realizados pela combustão por grelhas móveis (incineração com recuperação energética), 5% com

leito fluidizado e apenas 1% gaseificação (SCHMITKE, 2022) .

Esse domínio de mercado das grelhas móveis se deve ao fato delas conseguirem lidar com altas quantidades de resíduos sem uma triagem ou preparação prévia, facilitando a sua operação (MAKARICHI; JUTIDAMRONGPHAN; TECHATO, 2018).

A captura do biogás por sua vez não deveria ser considerada uma forma de tratamento térmico do resíduo, tendo em vista que o resíduo é enterrado e então as emissões geradas é que são tratadas (THEMELIS; ULLOA, 2007). Uma boa gestão de resíduo segue o princípio da hierarquia de resíduos, que determina quais são as preferências para o tipo destinação e lá está claro que aterro sanitário é recomendado que seja a última opção para o manejo do resíduo (ZHANG et al., 2022).

No entanto, como pode ser observado na Figura 2 e na Figura 9, o Brasil é dependente dos aterros sanitários e com o DF não é diferente. Um dos “problemas” ambientais que o aterro sanitário possui é ser um superemissor de metano, através do biogás (NASA, 2022). O metano é um gás mais potente que o dióxido de carbono para o efeito estufa – 86 vezes mais potente em 20 anos e 28 vezes mais em 100 anos – e um dos principais responsáveis pela destruição da camada de ozônio (COALITION, 2023). Um meio de resolver essa questão é capturar o biogás e por ter um alto poder calorífico, é possível aproveitá-lo na forma térmica ou elétrica.

Foram então, escolhidas 3 tecnologias para serem estudadas: incineração, gaseificação e a captura do gás de aterro.

3.2.1 Incineração com recuperação energética

As usinas de incineração de resíduos são uma solução que surgiram no final do século XIX, com o intuito de recuperar matérias-primas como ferro, alumínio, vidro e fibra de papel. No entanto, essa alternativa se aparentava desvantajosa do ponto de vista econômico, sem contar na preocupação que havia com os poluentes que a usina emitia (MAKARICHI; JUTIDAMRONGPHAN; TECHATO, 2018).

Com o passar dos anos, a tecnologia evoluiu e as usinas de incineração com recuperação energética começaram a ter três propósitos: redução do volume de

RSU, recuperação de energia e materiais, e limpar os gases resultantes do processo. Assim, com o avanço da tecnologia de combustão e controle de gases, aliado com aumento de preços do petróleo e a falta de espaços para aterramento do RSU, levaram a uma crescente demanda para essa nova tecnologia (MAKARICHI; JUTIDAMRONGPHAN; TECHATO, 2018).

Atualmente, o funcionamento de uma planta de incineração de resíduos com recuperação energética tradicional, basicamente funciona como uma termelétrica à resíduo. Veja os processos na Figura ??

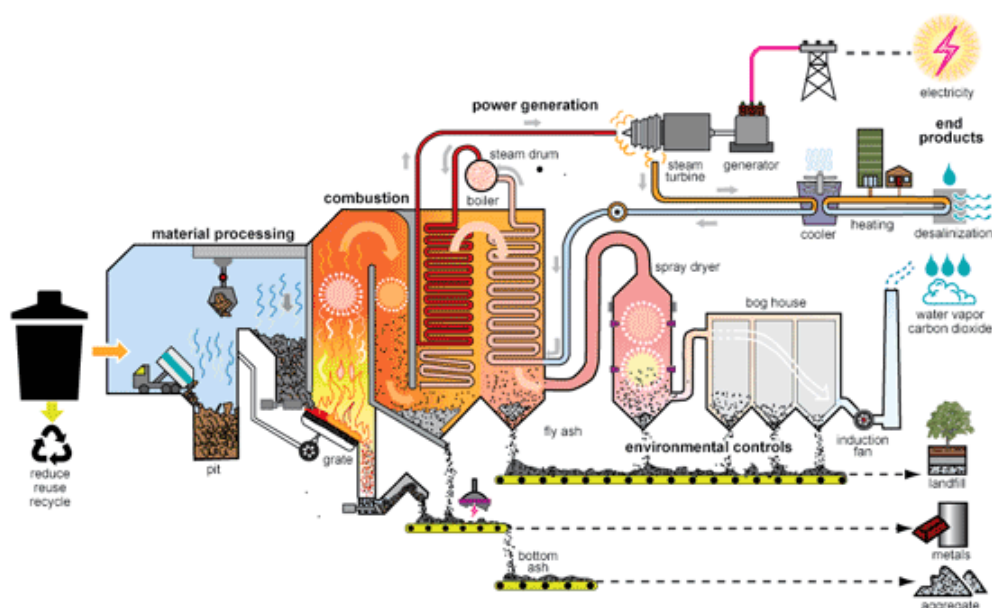


Figura 6 – Processos de uma planta de incineração de resíduos

Fonte: ABRENApInst com dados do Ecoprog de 2020

1. Os resíduos da coleta seletiva são despejados em um grande fosso.
2. Uma garra gigante em um guindaste agarra os resíduos e os despeja em uma câmara de combustão.
3. O resíduo (combustível) é queimado, liberando calor.
4. O calor transforma a água em vapor em uma caldeira.

5. O vapor de alta pressão gira as pás de uma turbina acoplada a um gerador para produzir eletricidade.
6. Um sistema de controle de poluição do ar remove poluentes do gás de combustível antes que ele seja liberado através de uma chaminé.
7. As cinzas são coletadas da caldeira e do sistema de controle de poluição do ar.

Objetivamente, este processo consiste em realizar a combustão direta do RSU e usar o calor para uso ou geração de energia elétrica. Entre as metodologias mais utilizadas, a que mais teve sucesso foi a de grelha móvel, devido sua necessidade reduzida de um pré-tratamento do resíduo (MAKARICHI; JUTIDAM-RONGPHAN; TECHATO, 2018).

Essas usinas têm uma vida útil entre 25 e 30 anos, podendo chegar até 40 anos dependendo de como ela foi construída e realizada as devidas manutenções (SUN; MENG; PENG, 2017; CORPORATION, 2023).

Para incineração, um teor de umidade de 50% é aproximadamente o limite superior para permitir a manutenção da combustão autossustentada, desde que a quantidade de inorgânicos não seja superior à 25% (KOMILIS; KISSAS; SYMEONIDIS, 2014).

Em Istambul foi inaugurada uma planta que trata 1.000.000 toneladas por ano, com 70 MW de potência instalada, sendo o resíduo local com um teor úmido entre 45 e 55%, com poder calorífico variando entre 6 MJ/kg e 9 MJ/kg (INOVA, 2017).

Sendo assim, será analisado em seu pleno teor, sem uma preparação prévia, apenas retirando os resíduos reciclados.

3.2.2 Gaseificação

A gaseificação, ou combustão indireta, converte o RSU em combustível ou gás de síntese, gerando produtos com alto poder calorífico como o monóxido de carbono, o gás hidrogênio e o metano. Esses produtos têm diversas aplicações

na indústria, podendo ser usado como combustível usando em uma caldeira com turbina a vapor, ou em um dispositivo de conversão de energia mais eficiente, como motores alternativos a gás ou turbinas a gás (ARENA, 2012).

A gaseificação é um processo térmico que ocorre com o aquecimento do combustível com pouco oxigênio ou com o uso de vapor, caso haja um excesso de ar então haverá uma combustão completa (ISWA, 2013). Um ponto importante da gaseificação a se destacar é a sua aplicabilidade, pois os resíduos que serão usados, como visto na Tabela 3, precisam de um pré-tratamento. “Uma das principais dificuldades da gaseificação de resíduos sólidos, especialmente os urbanos, estão relacionados à heterogeneidade dos resíduos” (BELGIORNO et al., 2003).

Comparativamente às usinas de incineração com recuperação energética, a gaseificação e a pirólise possuem impactos ambientais ainda menores, necessitando de menos métodos para o tratamento de emissões, mas devido a pobre eficiência dos gaseificadores e a grande mistura que há nos RSU e tamanho dos particulados, e presença alta de umidade, a tecnologia de incineração se sobressaiu no mercado de tratamento de resíduos (KUMAR; SAMADDER, 2017). Plantas de gaseificação para RSU tem uma vida útil estimada de 20 anos (NETO et al., 2021; ??).

O princípio básico de uma gaseificação são seus agentes gasificantes – ar, oxigênio e vapor. A escolha de um ou mais agentes determina a eficiência e o custo da gaseificação. O ar é a escolha com o menor custo, porém a presença do nitrogênio faz com que a eficiência térmica seja menor, o oxigênio por sua vez é mais eficiente e bem mais caro. De forma intermediária entre custo e eficiência utiliza-se o vapor, contudo, os processos com este agente necessitam geralmente de uma entrada de calor em seu processo (XU et al., 2018). Veja na Figura 7 uma representação dos estágios envolvidos para se fazer a gaseificação.

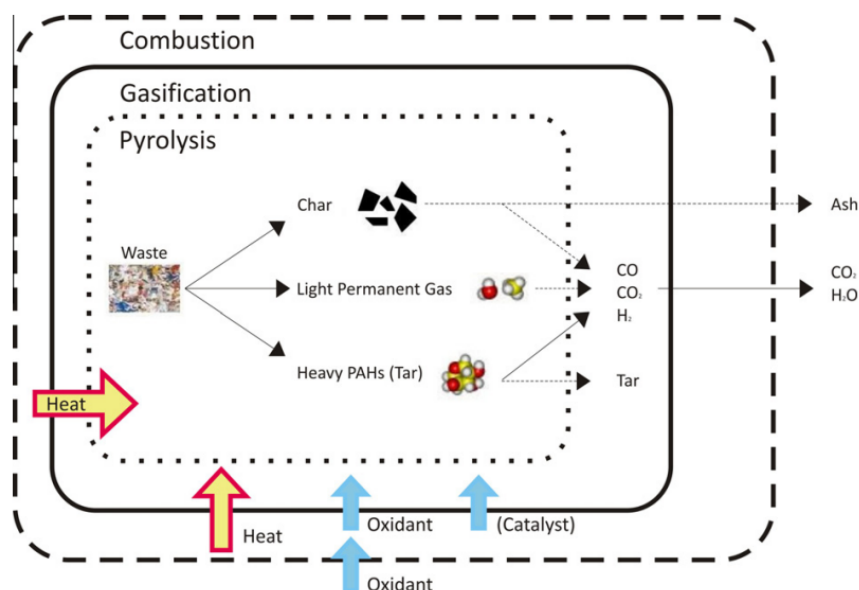


Figura 7 – Representação esquemática dos estágios de pirólise, gaseificação e combustão.

Fonte: elaborado por Knoef2005 e redesenhado por Arena2012

Como ilustrado pela Figura 7, existem 3 estágios importantes:

1. A combustão que fornece o calor necessário para ser realizado a gaseificação
2. A pirólise que decompõe termicamente os gases, o alcatrão e o carvão.
3. A gaseificação que é composta por várias reações químicas, que resultam no chamado gás de síntese.

No entanto, para resíduos sólidos urbanos, no qual o resíduo é totalmente misturado e com alto teor de humidade, a quantidade de matérias sem poder calorífico reduz a eficiência do processo, ao ponto em que há a possibilidade de que energia adicional (combustível) seja necessária (WANG et al., 2023).

Uma solução é fazer um combustível derivado de resíduos (CDR). Este é um método utilizado para se ter um composto com teores de 30% ou menos (REZAEI et al., 2020). A composição majoritariamente é composta por resíduos plásticos e

papéis, entre 50-80%, e o restante sendo orgânicos, madeira e têxtil (YANG et al., 2021).

3.2.3 Caputra do Biogás

A principal forma de disposição de resíduo no mundo são os aterros sanitários, principalmente em países em desenvolvimento (Kumar; Samadder, 2017). No Brasil, a gestão de resíduos ainda é composta majoritariamente por lixões e aterros controlados (ABRELPE, 2022).

O depósito controlado de resíduos sólidos urbanos (RSU) por meio de aterro sanitário envolve a cobertura do fundo com uma camada de argila ou polietileno de alta densidade para prevenir vazamentos. Nesse processo, os RSU são dispostos em camadas e cobertos com solo na parte superior, passando por um processo de fermentação em condições anaeróbias (WANG; GENG, 2015). Veja a Figura 8:

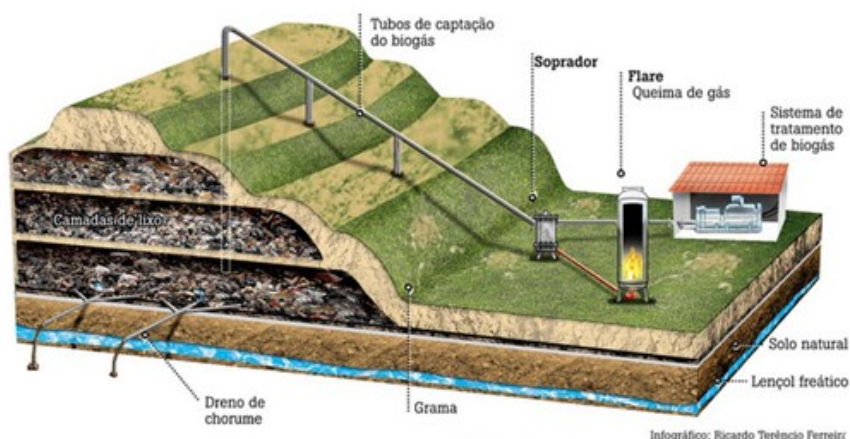


Figura 8 – Esquemático de um aterro com sistema de tratamento de biogás

Fonte: Saneamento (2018)

Adicionalmente, incorporam um sistema composto por poços e tubulações para a coleta eficiente do gás de aterro que é direcionado a uma caldeira ou turbina. Nesses dispositivos, o gás é queimado para a geração de calor ou eletricidade, ou então é simplesmente incinerado. Ao atingir a altura máxima, a área aterrada é encoberta por uma camada impermeável, reduzindo a entrada de água pluvial

e, conseqüentemente, minimizando as biorreações no interior do aterro (Themelis; Ulloa, 2007). A produção do gás de aterro diretamente ligada a capacidade de produção do metano. O metano por possuir um alto poder calorífico e ser uma das maiores parcelas encontradas no gás de aterro, é comumente utilizada para a geração de eletricidade (BARROS; FILHO; SILVA, 2014). O período para captação desse biogás varia conforme o tamanho do aterro e da taxa de resíduo enterrado. 20 a 25 anos é possível se utilizar o biogás para a geração de eletricidade (BACCHI et al., 2018; BARROS; FILHO; SILVA, 2014). O aterro ainda pode ser expandido, por exemplo, o aterro de Brasília que teve sua vida útil ampliada para 30 anos (SLU, 2023). A captura do gás de aterro para geração de eletricidade é uma necessidade, como já dita anteriormente, devido ao dano ambiental pela emissão do metano. Estudos apontam que as metodologias existentes para estimar a produção de metanos em aterros podem indicar números subestimados (MAASAKKERS et al., 2022).

No mundo a utilização da tecnologia já é bem difundida. Veja a quantidade plantas ao redor do mundo no ano de 2021 na Tabela .

No Brasil, já existem pelo menos 60 plantas que geram eletricidade utilizando o gás proveniente de aterros (CIBIOGAS, 2023). Brasília possui um projeto para a captação de biogás (SEPE, 2021b) e, além disso, a presença do teor de umidade em rejeito enterrado ajuda a produção do biogás. Um teor de 40% ou mais é o suficiente para promover a produção máxima de gás, portanto, o resíduo de Brasília é propício para a produção do biogás (SUBSTANCES; ASTDR, 2001).

3.2.4 Gases de efeito estufa

Os gases de efeito estufa (GEE) são responsáveis pelo aquecimento global. Efeito causado pelos gases (naturais e antropogênicos) que absorvem ou emitem radiação fazendo com que o calor que entra no planeta seja mantido, fazendo com que as temperaturas se elevem. Caso haja uma alta concentração desses gases, o aumento de temperatura proporcionado pode causar sérias mudanças climáticas no mundo inteiro (IPCC, 2023).

O aquecimento global virou o principal “vilão” a ser combatido. O mundo

Tabela 3 – Número de plantas que capturam o gás de aterro para gerar energia por país

País	Número de Plantas
Estados Unidos	325
Alemanha	150
Reino Unido	135
Suécia	70
Holanda	60
Italy	40
Canada	25
Australia	25
Dinamarca	21
Noruega	20
Áustria	15
França	10
Espanha	10
Suíça	10
Finlândia	10
Polônia	10
Brasil	6
República Tcheca	5
Hungria	5
China	3
Total	955

Fonte: Themelis e Ulloa (2007)

inteiro tem se reunido para fazer acordos de cooperação e de comprometimento na redução de emissões. O Brasil se comprometeu em reduzir em pelo menos, 50% das suas emissões até 2030 (??).

4 Objeto de Estudo

A escolha do objeto de estudo é o Resíduo Sólido Urbano, pelos motivos já citados no item 4.1. No entanto, devido o Brasil possuir características distintas entre seus estados, no âmbito político, social, econômico e natural, limitou-se o local de estudo, diminuindo a sua complexidade.

4.1 Local de Estudo

A definição do local de estudo Brasília, DF, teve sua motivação dado o seu interesse nos projetos de gestão de resíduos com energia já mencionadas e pela familiaridade do autor.

4.1.1 Resíduo de Brasília

Sobre Brasília, ela foi inaugurada no dia 21 de abril de 1960. Atualmente, ela possui 3 milhões de habitantes e uma área territorial de 5 760, 784 km² ([IBGE, 2022](#)).

Por meio do Decreto nº 41.693, de 5 de janeiro de 2021, o Serviço de Limpeza Urbana – SLU – foi instituída com a finalidade fazer a gestão da limpeza urbana e dos RSU no DF ([FEDERAL, 2021](#)). Dentre os serviços prestados ela tem a responsabilidade de coletar, transportar, tratar e dispor esses resíduos.

A coleta do lixo domiciliar destinada ao aterro, tem sido em média 800 mil toneladas por ano ([SLU, 2022](#)). De um total de 1 099,63 mil toneladas, pelo Gráfico 1 pode-se afirmar que mais do que $\frac{3}{4}$ do que é gerado é disposto em aterro sanitário, ou seja, 848,6 mil toneladas foram enterradas ([SINIR+, 2021](#)).

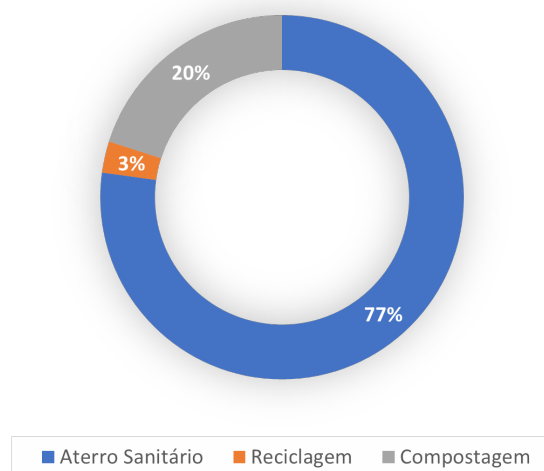


Figura 9 – Disposição e destinação dos RSU no DF em 2019

Fonte: SINIR+ (2021)

A gravimetria feita pelo SLU mostra porcentagens de várias regiões administrativas do DF. Veja na Tabela 1 a média do DF para cada tipo de resíduo.

Tabela 4 – Estimativa da composição dos resíduos do Distrito Federal em 2016

Tipo de Resíduo	Quantidade de Resíduos (Gg)	Percentual
Matéria Orgânica	531,6	48%
Papel	118,2	11%
Vidro	22,5	2%
Plástico	157,7	14%
Metal	16,5	2%
Outros	67,5	6%
Rejeitos	185,3	17%

Fonte: SERENCO (2017)

De acordo com a SERENCO (2017):

1. Material Orgânico: Resíduos alimentares; Resíduos de jardim;

2. Papel: Papel ondulado; Papel branco; Papel Misto; Outros papeis.
3. Plásticos: Polietileno de Alta Densidade - PEAD; Polietileno tereftalato - PET; Plástico mole PRETO (Comumente denominado "Seda Preta" representam em sua maioria sacos de lixo); Plástico mole MISTO; (Comumente denominado "Seda Mista", representam em sua maioria sacolas de supermercado); Outros plásticos.
4. Metais: Ferrosos; Não Ferrosos;
5. Vidros: Vidros de embalagens; Vidro plano
6. Outros Resíduos: Tecidos, vestuários e calçados; Madeira; Borracha; Isopor; Pilhas e baterias; Medicamentos; Eletroeletrônicos; Outros
7. Rejeitos:

“Compreendem todos os materiais inorgânicos, não passíveis de aproveitamento para reciclagem, como materiais com contaminantes biológicos e resíduos inertes.” (SERENCO, 2017)

Este percentual elevado de matéria orgânica eleva o teor de umidade, ou seja, a quantidade de água por unidade de massa de resíduo. Isso acaba causando a diminuição do potencial energético do resíduo (WANG et al., 2023). Sendo assim, esse teor é um fator determinante para avaliar cada tecnologia. Uma estimativa de 50% de teor de umidade para o resíduo de Brasília é coerente. O estudo de Drudi et al. (2019) estimou que o resíduo na cidade de Santo André possui 47,7% de teor de umidade médio. Outros estudos feitos na China – que possui uma composição de resíduo similar à do Brasil – apontam uma faixa parecida, entre 30 e 60% (SHI et al., 2016; ZHOU et al., 2014). De acordo com SINIR+ (2021), a reciclagem em 2019 de Brasília apresentava a seguinte composição:

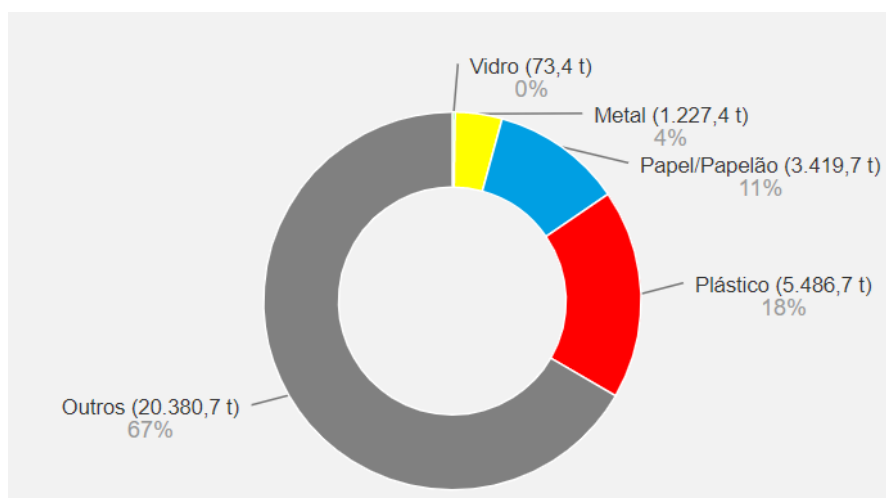


Figura 10 – Composição da reciclagem em Brasília

Fonte: (SINIR+, 2021)

Para as análises das rotas tecnológicas, foi considerado a exclusão dos resíduos reciclados da Figura 10.

5 Metodologia

O trabalho foi organizado seguindo os seguintes passos:

Primeiro foi feita uma revisão da literatura com o objetivo de selecionar publicações para auxiliar na fundamentação teórica.

Após essa etapa foi coletado dados sobre o resíduo de DF, sua composição e poder calorífico.

Depois, foi calculado o quanto de combustível cada rota possui a sua disposição.

Com esse resultado foi possível verificar qual o potencial elétrico para cada rota.

Por fim, foi feito cenários para estimar o potencial de emissão de gases de efeito estufa no setor de resíduos do DF.

5.1 Revisão Sistemática de Literatura

A revisão sistemática proposta foi inspirada no modelo apresentado por Silva, em 2020, baseado na Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado (TE-MAC). O modelo possui 2 etapas, no qual cada etapa está subdividido em sub etapas. Veja Figura 11.

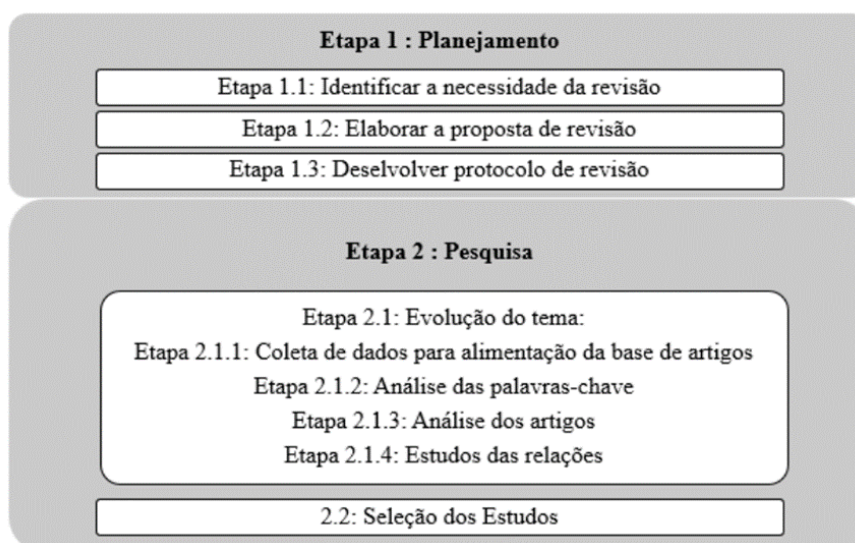


Figura 11 – Procedimentos da Revisão de Literatura

Fonte: [Silva \(2020\)](#)

5.1.1 Etapa 1: Planejamento

5.1.1.1 Etapa 1.1: Identificar a necessidade de revisão

Recuperação energética é um tema multidisciplinar. Aborda questões ambientais, de saneamento e energéticas tornando o assunto complexo. Conceitos-chaves precisam ser delimitados e esclarecidos para que haja concordância com a literatura, tendo em vista que o grau de dificuldade pode trazer confusão ao pesquisador e aos leitores. Logo, precisa-se encontrar as principais referências dos principais autores para que o presente estudo esteja alinhado.

5.1.1.2 Etapa 1.2: Elaborar a proposta de revisão

A revisão tem como objetivo munir o pesquisador de informações para que possa navegar entre as diferentes rotas tecnológicas a fim de poder avaliar cada uma em questões técnicas, sociais e econômicas.

No entanto, muitas informações estão publicadas em relatórios técnicos de entidades. Cabe então, avaliar também a credibilidade das entidades. No presente

trabalho foi consultado entidades Federais do Brasil e dos Estados Unidos, a Organização das Nações Unidas e dos prestadores e reguladores de serviços envolvidos com resíduos e energia.

5.1.1.3 Etapa 1.3: Desenvolver protocolo de revisão

Primeiramente, foram escolhidas as bases em que serão feitas a revisão. Web of Science e Scopus foram as preteridas. As palavras chaves alvo da revisão serão relatadas na etapa 2.1.

5.1.2 Etapa 2: Pesquisa

5.1.2.1 Etapa 2.1: Evolução do Tema

As pesquisas foram realizadas nas bases da Web of Science e Scopus. As palavras-chaves escolhidas foram as 3 tecnologias: Waste-to-Energy, “biogas” e gasification, combinadas com “energy recovery” ou “waste management”, para delimitar o campo de busca. Logo:

```
waste-to-energy AND "energy recovery" waste-to-energy AND "waste management" biogas AND "waste management" biogas AND "energy recovery" gasification AND waste gasification AND "energy recovery" gasification AND "waste management"
```

5.1.2.1.1 Etapa 2.1.1 Coleta de dados para a alimentação da base de artigos

Feita a pesquisa das palavras, encontrou que os temas das pesquisas estavam dentro do escopo proposto (veja Figura de palavras), o único filtro adicionado após ele foi o campo de pesquisa “engineering”.

Os autores mais relevantes foram:

Foi verificado os seus principais artigos a fim de certificar sua relação com o tema do trabalho proposto. Além disso foi feita uma análise dos estudos ao longo do tempo. Veja as figuras a seguir.

Tabela 5 – Pesquisa e Principais Autores

Pesquisa	Autores	Autores Brasileiros
waste-to-energy AND "energy recovery"	Themelis N J; Kwon E E; Grosso M; Pavlas M	Palacios-bereche R (5); Gallego Ag (3); A C M Jimenez (3)
waste-to-energy AND "waste management"	Kwon E E; Themelis N J; Jung S; Pavlas M; Grosso M	Nebra S A (4); Palacios-bereche R (3); Gallego Ag (4)
biogas AND "waste management"	Li Y; Zhang Y; Liu Y	Chernicharo C A L; Zaiat M; Barros R M
biogas AND "energy recovery"	Zhang Y; Liu Y; Zhang X; Di Maria F; Li L	Chernicharo C A L; Forster-carneiro T; Barros R M
gasification AND "energy recovery"	Wang Z; Zhang Y; Gupta A K; Li J; Li X;	Gonzales A M; Lora E E S; Martinez G A
gasification AND "waste management"	Han H J; Wang C H; Zhang Y; Arena U; Han H	Godinho M; De Sena R F; Perondi D

Fonte: Elaborado pelo autor.

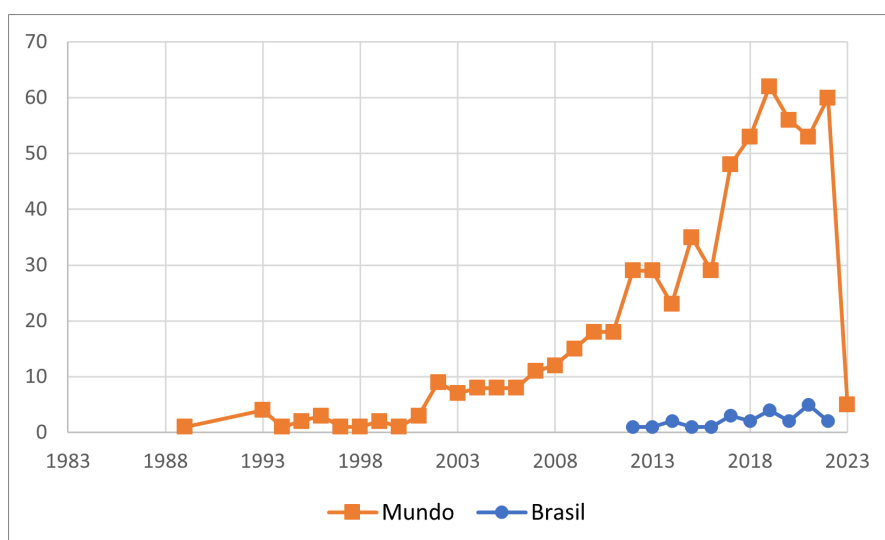


Figura 12 – Estudos ao longo do tempo com as palavras chaves waste-to-energy AND energy recovery

Fonte: autoria própria

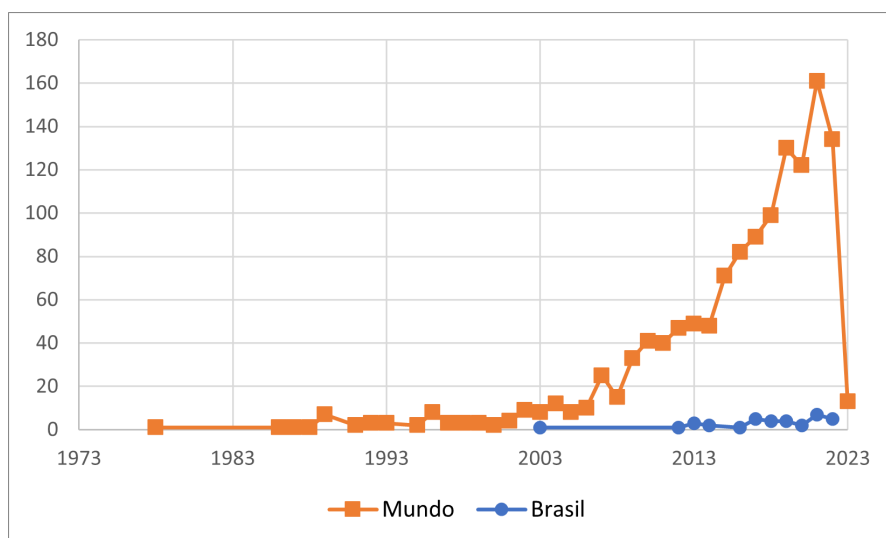


Figura 13 – Estudos ao longo do tempo com as palavras chaves waste-to-energy AND waste management

Fonte: autoria própria

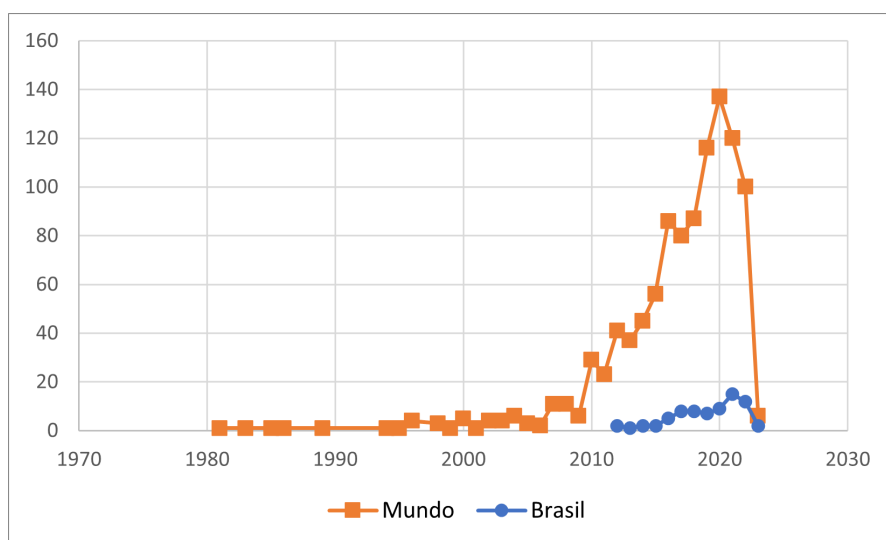


Figura 14 – Estudos ao longo do tempo com as palavras chaves biogas AND energy recovery

Fonte: autoria própria

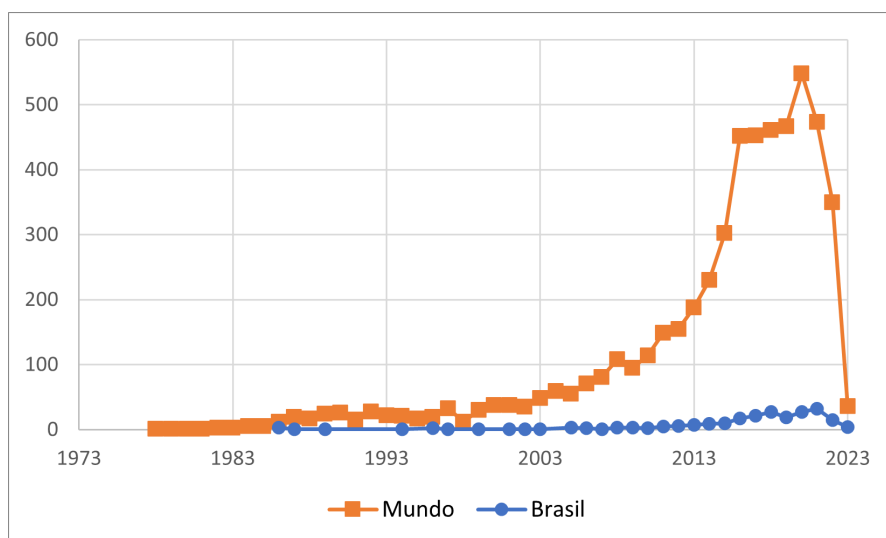


Figura 15 – Estudos ao longo do tempo com as palavras chaves biogas AND waste management

Fonte: autoria própria

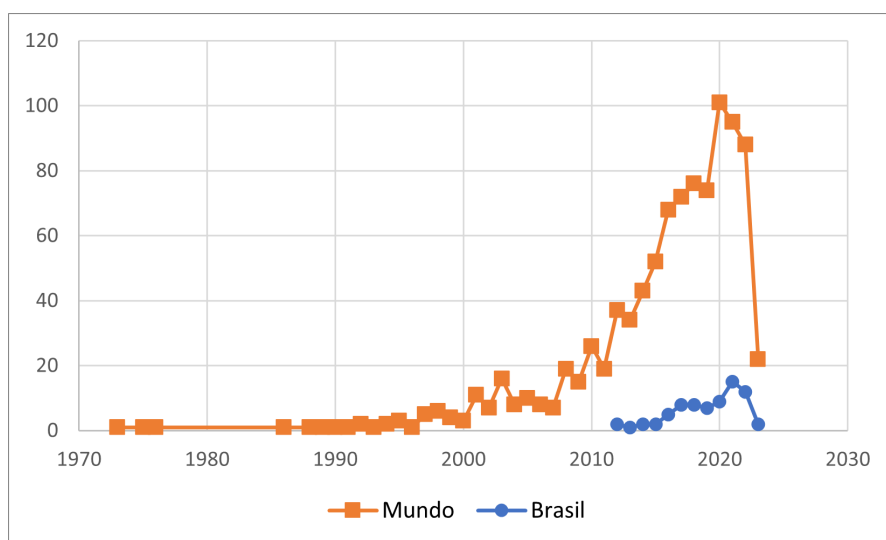


Figura 16 – Estudos ao longo do tempo com as palavras chaves gasification AND energy recovery

Fonte: autoria própria

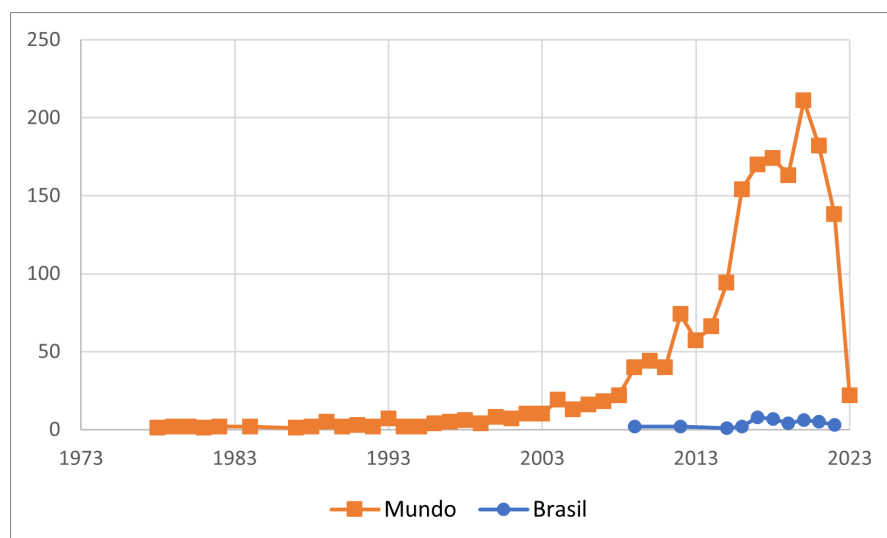


Figura 17 – Estudos ao longo do tempo com as palavras chaves gasification AND waste management

Fonte: autoria própria

Pelas figuras de 14 a 18 percebe-se um leve aumento no início dos anos 2000, mas ganha força a partir da década de 2010, atingindo o seu pico em 2020. Com isso pode-se tirar minimamente que este assunto é recente e vem ganhando força no cenário mundial. No Brasil está se começando a surgir alguns estudos nessa área, mas ainda não se demonstra tão relevante e expressivo dentro da academia.

5.1.2.1.2 Etapa 2.1.2: Análise das palavra-chave

Coletada as palavras-chaves dos autores da pesquisa referente à base online da Scopus, utilizou-se o website TAGCROWD. Esse website possui uma ferramenta que analisa palavras de um texto que o usuário insere manualmente, em um endereço eletrônico ou em um arquivo. As palavras-chaves dos autores foram colocadas em um arquivo .txt e feito o upload na ferramenta, obtendo o seguinte resultado.

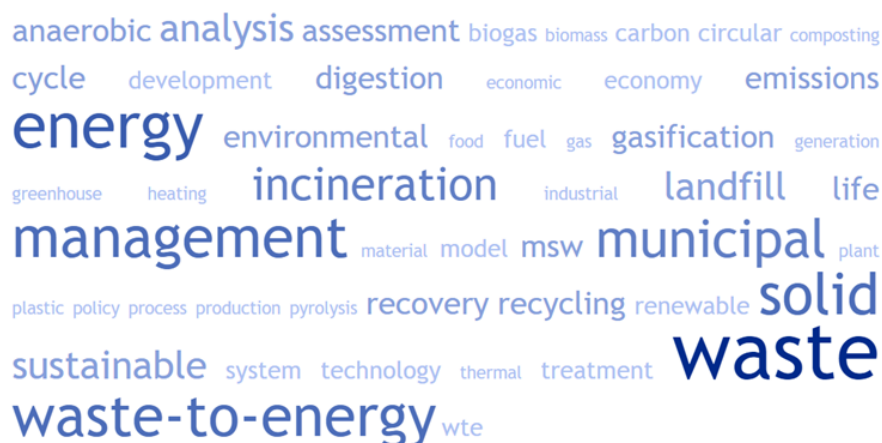


Figura 18 – Nuvem de palavras da revisão da literatura

Fonte: autoria própria utilizando o TAGCROWD

Quanto maior o tamanho e mais forte for a cor significa que a palavra se repete com maior frequência do que as que possuem um tamanho menor e tem uma cor mais fraca. Logo, percebe-se que waste, energy, management e waste-to-energy são as palavras que mais se destacam. Indica, portanto, uma boa relação das palavras com os artigos.

5.1.2.1.3 Análise dos artigos

Nesta etapa é pormenorizada como uma análise da relevância dos artigos e autores. Neste estudo, foram consultados os estudos e autores mais citados. A análise dos artigos visa, além de destacar estudos relevantes, localizar o pesquisador sobre o tema no contexto global, além de compará-lo com o que está acontecendo no país de origem, que neste caso é o Brasil.

Tabela 6 – Principais autores e a representatividade do país em pesquisa de artigos por palavras-chave (%)

Palavras-chave	País e Representatividade do país (%)	Autores – Mundo
waste-to-energy AND "energy recovery"	EUA (16%); Itália (14%); China (13%)	Themelis N J; Kwon E E; Grosso M; Pavlas M
biogas AND "energy recovery"	China (16%); Itália (10%); EUA (9%)	Zhang Y; Liu Y; Zhang X; Di Maria F; Li L
biogas AND "waste manage- ment"	China (18%); EUA (9%); Espanha (7%)	Li Y; Zhang Y; Liu Y
gasification AND "energy recovery"	China (18%); EUA (9%); Itália (9%)	Wang Z; Zhang Y; Gupta A K; Li J; Li X;
gasification AND "waste manage- ment"	China (27%); EUA (11%); Itália (8%)	Han H J; Wang C H; Zhang Y; Arena U; Han H

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Principais autores brasileiros e a representatividade brasileira em pesquisa de artigos por palavras-chave

Palavras-chave	Representatividade do Brasil (%)	Autores Brasileiros
waste-to-energy AND "energy recovery"	5%	Palacios-bereche R; Gallego A G; A C M Jimenez
biogas AND "energy recovery"	7%	Chernicharo C A L; Forster-carneiro T; Barros R M
biogas AND "waste management"	4%	Chernicharo C A L; Zaiat M; Barros R M
gasification AND "energy recovery"	4%	Gonzales A M; Lora E E S; Martinez G A
gasification AND "waste management"	2%	Godinho M; De Sena R F; Perondi D

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os países com mais destaque em todas as rotas tecnológicas são a China e os Estados Unidos da América (EUA). Itália apresenta bons números de estudos também. No Brasil, os estudos mais evidentes são na área de biogás, tecnologia que é a mais comum dentre as pesquisadas, mas ainda são temas que se mostraram em início de desenvolvimento. Zhang Y na área de Biogás e Gaseificação é um expoente notório, enquanto na parte *Waste-to-Energy* ou Recuperação Energética, Themelis N J, Kwon E E, Grosso M e Pavlas M são seus representantes. No Brasil, Palacios-Bereche R e Chernicharo C A L são os autores com mais artigos, mas o fato que ainda há poucas publicações.

5.1.2.1.4 Etapa 2.2 Seleção de estudos

Com as análises feitas, foram feitas buscas na base Web of Science com as palavras-chaves e foram selecionados artigos para auxiliarem este trabalho. Foram

identificados os objetivos de seleção daquele artigo, a tecnologia que ele trata e os Autores e seus países.

Tabela 8 – Análise de cada artigo selecionado por objetivo, tecnologia analisada e o país

Estudo	Objetivo	Tecnologia Analisada	País
Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA	Reforçar a motivação de implementar a incineração	Incineração	Grécia e EUA
A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste	Analisar a viabilidade técnica-econômica das diferentes rotas tecnológicas: incineração, pirólise, gaseificação, digestão anaeróbica e aterramento com captura de gás metano	Incineração, gaseificação e Captura de Gás Metano com Geração de Energia	Índia
The evolution of waste-to-energy incineration: A review	Demonstrar a evolução tecnológica da incineração de resíduos	Incineração	Tailândia
Waste to energy - key element for sustainable waste management	Incluir a incineração de resíduos em uma gestão sustentável dos resíduos	Incineração	Áustria
Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review	Entender o processo e avaliar criticamente a aplicabilidade e viabilidade da gaseificação	Gaseificação	Itália
Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier	Assistir à simulação proposta de geração de biomassa	Gaseificação	Tailândia
Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil	Comparar a viabilidade de Brasília com esse estudo	Incineração e Captura de Gás Metano para Geração de Energia	Brasil
Methane generation in landfills	Avaliar o potencial da captura de metano	Captura de Gás Metano com Geração de Energia	EUA

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além desses artigos, outros importantes estudos foram utilizados para complementar certos tópicos mais específicos por exemplo sobre o teor humidade nos resíduos - Rezaei et al. (2020) e Yang et al. (2021) - e estudo por exemplo encontrado ao pesquisar por "landfill" e "biogas" - Barros, Filho e Silva (2014).

5.2 Combustível de resíduo

Para se calcular a energia total que possui os resíduos do DF, cada rota possui uma abordagem diferente para se definir quanto de matéria há para se produzir a energia.

A rota da incineração é a mais simples, é o resíduo bruto, ou seja, a massa total para a rota da incineração é a massa total dos resíduos do DF.

Para gaseificação, foi feita uma seleção, excluindo os reciclados, no qual todo o resíduo de papel e plástico fossem 50% dessa composição para que o poder calorífico resultante seja maior. O resíduo "Outros" e o resíduo orgânico somam o restante da composição. Como a fração de matéria orgânica é bem alta, grande parte dela não poderá ser tratada. Veja a tabela 9:

Tabela 9 – Composição escolhida do resíduo para gaseificação

Fração	Blend	Resíduo Tratado (Gg)	Poder Calorífico Inferior Ponderado (MJ/kg)	Razão de Resíduos Tratados
Matéria Orgânica	37%	98,79	1,5	19%
Outros	13%	67,05	2,4	97%
Papel	21%	114,80	3,4	97%
Plástico	29%	152,20	10,0	99%

Fonte: Autoria própria

Por fim, a captura do gás de aterro para gerar eletricidade, depende da decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos que foram aterrados. Logo, é necessário saber a quantidade de metano que é possível ser produzida.

5.2.1 Produção de metano

A produção estimada do gás de aterro está ligada diretamente com a estimativa de produção do gás metano e “geralmente é estimada por uma equação cinética de primeira ordem como foi usada no software LandGem® criado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos” (BARROS; FILHO; SILVA, 2014), dada por:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \frac{M_i}{10} e^{-kt_{i,j}} \quad (5.1)$$

Onde:

Q_{CH_4} : é a produção de metano calculado

i : incremento de 1 ano;

n : (ano de cálculo) – (ano inicial do recebimento de resíduo); j : incremento de 0,1 ano;

k : a taxa de geração de metano por ano;

L_0 : a capacidade potencial de geração de metano (m³/Mg);

M_i : o resíduo coletado no i -ésimo ano (Mg);

$t_{i,j}$: o ano do j -ésimo seção do resíduo M_i coletado no i -ésimo ano.

Um período adotado para a análise da metodologia foi de 30 anos, similar ao período adotado por Lima et al. (2018) e estimativa do SLU (2023) para o Aterro Sanitário de Brasília (ASB).

5.2.1.1 LandGEM

“O LandGEM baseia-se em uma equação de taxa de decomposição de primeira ordem para quantificar as emissões da decomposição de resíduos aterrados em aterros de RSU. O software oferece uma abordagem relativamente simples para estimar as emissões de gás de aterro” (ALEXANDER; BURKLIN; SINGLETON, 2005).

Este software consiste em uma planilha excel no qual o usuário configura e fornece dados em 4 passos (Veja Figura 19) e com a implementação da equação (5.1) sobre a quantidade de metano gerado ou algum outro poluente a ser analisado.

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Value (tons/year)
2023		0
2024	1.089.093	1.198.002
2025	1.089.093	1.198.002
2026	1.089.093	1.198.002
2027	1.089.093	1.198.002
2028	1.089.093	1.198.002
2029	1.089.093	1.198.002
2030	1.089.093	1.198.002
2031	1.089.093	1.198.002
2032	1.089.093	1.198.002
2033	1.089.093	1.198.002
2034	1.089.093	1.198.002
2035	1.089.093	1.198.002
2036	1.089.093	1.198.002
2037	1.089.093	1.198.002
2038	1.089.093	1.198.002
2039	1.089.093	1.198.002
2040	1.089.093	1.198.002
2041	1.089.093	1.198.002
2042	1.089.093	1.198.002
2043	1.089.093	1.198.002
2044		
2045		
2046		

Figura 19 – Tela de recebimento de dados de entrada do LandGEM

Fonte: captura de tela do Software LandGEM

As configurações e os dados de entrada fornecido foram:

1. Características do Aterro Sanitário
 - a) Ano de abertura: Considerou-se o ano atual, 2023
 - b) Ano de encerramento: Considerou-se 2024 + 19 anos, 2043
 - c) Calcular do ano de fechamento: Não
 - d) Limite de capacidade de recebimento de resíduo: em branco.
2. Determinar os parâmetros do modelo
 - a) parâmetros de geração de metano k: CAA Convencional = 0,05
 - b) O potencial geração de metano L_0 : CAA Convencional = 170
 - c) a concentração de Compostos Orgânicos Não-metânicos (NMOC): CAA = 4000

- d) percentual volumétrico do gás metano no gás de aterro: $CAA = 50\%$
volume

3. Selecionar os gases/poluentes

- a) Gás/poluente 1: Total landfill Gas
- b) Gás/poluente 2: Methane
- c) Gás/poluente 3: Em branco
- d) Gás/poluente 4: Em branco

4. Inserir os dados resíduos dispostos

- a) Definição da unidade: Mg/year
- b) Inserção dos de quantidade resíduos depositados em cada ano a ser analisado: Considerou-se um quantitativo igual para todos os anos de 1.089.093 Mg/ano de 2024 a 2043. Número total de resíduos removendo a fração reciclada.

Considerou-se um quantitativo igual para todos os anos de 1.089.093 Mg/ano de 2024 a 2043. Número total de resíduos removendo a fração reciclada.

Year	Methane Emissions (m ³ /year)	WASTE ADDED IN YEAR 1		
		YEAR	WASTE	EMISSIONS
2024	0,000E+00	0	0	0,000E+00
2025	9,052E+06	1	0	0,000E+00
2026	1,766E+07	2	0	0,000E+00
2027	2,585E+07	3	0	0,000E+00
2028	3,365E+07	4	0	0,000E+00
2029	4,106E+07	5	0	0,000E+00
2030	4,811E+07	6	0	0,000E+00
2031	5,481E+07	7	0	0,000E+00
2032	6,119E+07	8	0	0,000E+00
2033	6,726E+07	9	0	0,000E+00
2034	7,303E+07	10	0	0,000E+00
2035	7,852E+07	11	0	0,000E+00
2036	8,374E+07	12	0	0,000E+00
2037	8,871E+07	13	0	0,000E+00
2038	9,344E+07	14	0	0,000E+00
2039	9,793E+07	15	0	0,000E+00
2040	1,022E+08	16	0	0,000E+00
2041	1,063E+08	17	0	0,000E+00
2042	1,101E+08	18	0	0,000E+00
2043	1,138E+08	19	0	0,000E+00
2044	1,173E+08	20	0	0,000E+00
2045	1,116E+08	21	0	0,000E+00

Figura 20 – Tela de saída com a produção de metano por ano

Fonte: captura de tela do Software LandGEM

Fazendo a soma do período 2024 a 2043 da Figura 20 tem-se quanto que um aterro se iniciado em 2024 no DF pode gerar de metano em 20 anos.

5.3 Potencial elétrico do resíduo sólido urbano

Para o cálculo do potencial elétrico, definiu-se um período para se fazer a análise das rotas.

Gaseificação e a captura de biogás possuem vida útil próximas a 20 anos, enquanto a incineração consegue ter vida útil maior, chegando até 40 anos.

Assim foi feito o seguinte cenário: Para se avaliar o potencial elétrico de cada rota, foi determinado um período de 20 anos para a produção de eletricidade. Em um ano, cada usina irá operar por 8.000h.

5.3.1 Potência térmica

Considerando potência como sendo a energia liberada por unidade de tempo (ÇENGEL; BOLES, 2005), temos:

$$\dot{W}_t = \frac{m \times PCI}{t} \quad (5.2)$$

No qual m é a massa do combustível, PCI é o poder Calorífico Inferior do combustível, e t é o tempo em que a energia foi liberada em um ano de operação de uma usina em segundos, sendo o tempo de operação 8.000h.

5.3.2 Energia térmica

A energia térmica total que pode ser liberada para cada tecnologia analisada pode ser definida utilizando a equação (1) multiplicando-a pelo tempo de operação anual, 8.000 h e pelo período analisado em anos.

$$E_t = \dot{W}_t \times n \times 8000 \quad (5.3)$$

Assim, temos a energia acumulada em 20 anos para cada rota.

Para a rota de captura do gás metano é necessário levar em consideração a eficiência da coleta do gás metano (BARROS; FILHO; SILVA, 2014). Logo:

$$E_i = v_{CH_4,i} c_{CH_4} \eta_{coleta} \quad (5.4)$$

No qual v_{CH_4} é o volume de gás metano no ano i ; c_{CH_4} é o poder calorífico do metano equivalente à $35,53 \times 10^6$ J/m³; e η_{coleta} é a eficiência da coleta do gás. A quantidade de gás metano gerado foi calculado através do software LandGEM.

Já eficiência da coleta em aterros sanitários ainda causa dúvidas. Existem casos de aterros com eficiência variadas. Na Dinamarca estudos tiveram uma média de 50%, variando entre 13% e 90%. Um estudo feito por Barlaz; Chanton e Green (2009), aponta variações entre 50% e perto 100%. A USP em parceria com a CETESB promoveu um estudo voltado para o Brasil e aponta uma eficiência máxima de até 75% segundo instituições como World Bank (MAGALHÃES et al., 2010).

Além disso, imagens de satélites recentes mostram aterros sendo superemissores de metano, extrapolando os inventários atuais de metano (MAASAKKERS et al., 2022; NASA, 2022). Para fins de cálculos, será analisado com uma eficiência de coleta de 50%.

5.3.3 Potência elétrica

A potência elétrica foi calculada multiplicando a eficiência elétrica líquida e a potência térmica calculada pela equação (5.2):

$$\dot{W}_e = \dot{W}_t \eta_{e,liq} \quad (5.5)$$

5.3.4 Energia elétrica

Por fim, a energia elétrica total dos 20 anos é calculada multiplicando a potência elétrica encontrada na equação (5.5), a horas de operação em 1 ano e os 20 anos de análise:

$$E_{e,20anos} = \dot{W}_e \times 8000 \times 20 \quad (5.6)$$

Uma definição importante para qualquer processo de combustão é o poder calorífico do combustível, ou, a quantidade de calor liberado por ele quando há ele é consumido por completo, tendo em vista um processo de fluxo contínuo e no qual os produtos retornam ao estado de reagentes (ÇENGEL; BOLES, 2005).

Em termodinâmica, existem 2 tipos de poderes caloríficos:

“O poder calorífico é chamado de Poder Calorífico Superior (PCS) quando o H₂O nos produtos está na forma líquida, e é chamado de Poder Calorífico Inferior (PCI) quando o H₂O nos produtos está na forma de vapor” (ÇENGEL; BOLES, 2005).

Devido aos diversos tipos materiais existentes dentro dos resíduos sólidos urbanos, o poder calorífico varia de material para material. Veja o poder calorífico de acordo com o material na Tabela 10.

Tabela 10 – Poder Calorífico Inferior Aproximado para RSU

Fração	Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)
Papel	16
Material Orgânico	4
Plástico	35
Vidro	0
Metal	0
Têxtil	19
Outros	11

Fonte: [WORLD ENERGY COUNCIL \(2016\)](#)

Neste trabalho, a fração “Outros” da Tabela 4 considera-se o poder calorífico de “Têxtil” da Tabela 10”, tendo em vista a explicação da SERENCO (2017) classificar "Outros" como o Tecidos, vestuários e calçados, etc. O “Outros” da Tabela 6 não foi utilizado nas análises

Considerando que em média 1 kg de RSU em Brasília possui a gravimetria disposta na Tabela 1 e o PCI mostrado na Tabela 6, o PCI médio do lixo de Brasília seria a soma do PCI de cada material ponderada pela sua fração.

$$PCI_{m\u00e9dio} = \sum PCI_{RSU_i} \times \phi_{RSU_i} \quad (5.7)$$

Sendo ϕ a fração do material i em 1 kg de res\u00edduo.

5.3.4.1 Sele\u00e7\u00e3o da composi\u00e7\u00e3o de um combust\u00edvel derivado de res\u00edduo para gaseifica\u00e7\u00e3o

O poder calor\u00edfico calculado \u00e9 an\u00e1logo \u00e0 incinera\u00e7\u00e3o, de forma a ser utilizado a equa\u00e7\u00e3o (5.7). Note que os materiais a serem analisados s\u00e3o os descritos em (colocar referencia da tabela de RSU) Mas, conforme explicado no item 3.2.2, o RSU \u00e9 um composto com um teor de umidade elevada. Para gaseifica\u00e7\u00e3o \u00e9 ideal que fa\u00e7a uma pr\u00e9-tratamento e que o res\u00edduo a ser tratado termicamente tenha um alto poder calor\u00edfico.

Deste modo, sendo pl\u00e1stico e papel os principais materiais, foi feito uma sele\u00e7\u00e3o de res\u00edduos no qual o CDR seja composto pelo menos de 50% de pl\u00e1stico e papel. Os outros 50% seriam compostos por org\u00e2nicos e outros – tecidos, madeira, borracha, isopor, pilhas e baterias, medicamentos, eletrodom\u00e9sticos. Note que para gaseifica\u00e7\u00e3o metal, vidro e rejeitos n\u00e3o foram contabilizados, dado que s\u00e3o materiais sem poder calor\u00edfico diminuiriam o PCI.

A partir dos percentuais para cada material calculado, visando tratar 100% dos pl\u00e1sticos e pap\u00e9is, encontrou-se a quantidade para cada material que seria poss\u00edvel tratar atrav\u00e9s da gaseifica\u00e7\u00e3o.

5.3.5 Efici\u00eancia el\u00e9trica l\u00edquida

A efici\u00eancia do sistema depende de v\u00e1rios fatores, como por exemplo o tamanho da usina, o tipo de ciclo termodin\u00e2mico aplicado e o combust\u00edvel utilizado (ÇENGEL; BOLES, 2005).

5.3.5.1 Efici\u00eancia para Incinera\u00e7\u00e3o de RSU

Tendo em visto a vasta quantidade de plantas ao redor do mundo de incinera\u00e7\u00e3o de res\u00edduos e a maturidade da tecnologia, foi poss\u00edvel v\u00e1rias inova\u00e7\u00f5es para

aumentar a eficiência dessas plantas. Considerando tipicamente que plantas que operam a 50 bar/500°C tem uma eficiência aproxima de 24% (MADSEN et al., 2008). Um trabalho feito por Bogale e Viganò (2014), faz uma comparação entre usinas e métodos diferentes com uma planta convencional de 27,25% de eficiência. Veja o Quadro 1 que exemplifica 3 métodos aplicados em usinas de incineração com recuperação energética que estão em operação e seus ganhos quando comparado a uma usina convencional (BOGALE; VIGANÒ, 2014).

Tabela 11 – Estados-da-arte de tecnologias de combustão de resíduos

Metodologia	Explicação	Ganho	Fonte
SteamBoost	A ideia central é dividir o gás de combustão em frações corrosivas e menos corrosivas, utilizando a fração menos corrosiva para o superaquecedor Steamboost. Este superaquecedor é posicionado sobre a parte final da grelha, numa zona com gás "não-corrosivo", para minimizar a formação de depósitos e a corrosão.	2,4%	(MADSEN et al., 2008)
Método Clássico de Amsterdã	Reaquecimento de parte do vapor após a turbina de alta pressão usando um trocador de calor de casco e tubo vapor-vapor para obter uma eficiência elétrica líquida de 30%.	3,7%	(BERLO; WANDSCHNEIDER, 2006)
Planta de Brescia	Metodologia foca em parâmetros de vapor aumentados (pressão e temperatura), perdas reduzidas de gás de combustão, consumo minimizado na usina, pré-aquecimento do ar de combustão e combustão com baixo excesso de ar.	2,5%	(BONOMO, 2012)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste trabalho, adotou-se a eficiência para análises de 30%.

5.3.5.2 Eficiência para gaseificação de RSU

Dependendo do ciclo termodinâmico adotado, a eficiência elétrica varia. Modernos sistemas de turbinas a vapor conseguem atingir 31% de eficiência elétrica

líquida; motores a gás conseguem uma eficiência entre 34% e 41%; turbina a gás em torno de 30%; e um sistema de ciclo combinado de turbina a gás em larga escala mais de 55% enquanto em pequena escala por volta de 41% (PANEPINTO et al., 2015).

Quando estamos analisando essas tecnologias para gaseificação de RSU, a eficiência da geração elétrica é consideravelmente diminuída. Veja a Tabela 7.

Tabela 12 – Eficiência elétrica líquida de diferentes processos

	Combustão		Gasificação e pirólise	
	Ciclo a vapor	Ciclo a Vapor	Motor a gás	Ciclo combinado de turbina a gás
$\eta_{\text{elétrica líquida}}$ (%)	19-27	9-20	13-24	23-26

Fonte: Fichtner Consulting Engineers Ltd (2004)

O ciclo combinado de turbina a gás foi escolhido, a fim de se obter um processo mais eficiente, mesmo que o uso de syngas para ciclo combinado não tenha sido amplamente comprovado (PANEPINTO et al., 2015). Adotou-se então uma eficiência de 25%.

5.3.5.3 Eficiência para Gás de aterro

A eficiência da conversão elétrica, que é uma indicação de qual parte do valor energético do gás de aterro pode ser convertida em energia elétrica, varia de acordo com cada tecnologia. A eficiência pode ser descrita em termos da "taxa de calor" líquida da usina (Btu/kWh) ou da eficiência bruta do equipamento. Essa eficiência é igual ao valor total da energia no gás de aterro coletado dividido pelo valor da energia fornecida à rede. A energia líquida fornecida à rede é igual à saída total do gerador menos quaisquer perdas parasitárias da usina. Essas perdas parasitárias incluem a energia gasta em compressores de gás, bombas de água da camisa, bombas de óleo lubrificante, ventiladores do radiador, ventiladores do gerador, transformador da estação e outros auxiliares da estação (ESMAP, 2004).

Veja na Tabela 8 as características para tecnologias que são utilizadas para gerar eletricidade com o gás de aterro.

Tabela 13 – Eficiência de conversão elétrica para diferentes tecnologias

Tecnologia	Faixa de vazão típica (m ³ /h)	Tamanho da Planta recomendado	Eficiência de conversão elétrica (%)
Microturbinas	< 170	< 100 kW	25-30
Motores alternativos	> 255 a 8495	0,5 a 12 MW	32-40
Turbina à gás	> 6796 a 33980	3 a 18 MW	26-32
Turbinas à vapor	> 10194 a 42475	10 a 50 MW	24-29
Sistemas de Ciclo Combinado	> 8495 a 42475	> 10 MW	38-45

Fonte: [ESMAP \(2004\)](#)

Considerando motores alternativos, adotou-se uma eficiência de conversão elétrica de 35%.

5.4 Potencial Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) dos resíduos utilizando o WARM

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) são um problema ambiental e a meta do Brasil de acordo com a Contribuição Nacionalmente Determinada é reduzir suas emissões em 37% até 2025, 43% até 2030.e alcançar emissões líquidas neutras até 2050.

Parte dessas emissões é de responsabilidade do setor de resíduos sólido. Dados do [SEEG - Sistema de Estimativa de Emissão de Gases \(2023\)](#) apontam que em 2021, o setor de resíduos contribuiu com 3,8% das emissões de um total de 2,4 Gt de CO₂e.

O software Waste Reduction Model (WARM) estima o potencial de redução de emissões de GEE, energia economizada e impacto econômicos de vários meios

de gestão de resíduos, entre eles a recuperação energética.

A metodologia geral do WARM se resume na seguinte fórmula:

$$E_{liq,GEE} = E_{bru,abr} - (E_{estoque,c} + E_{mit,pub}) \quad (5.8)$$

No qual as emissões líquidas de gases de efeito estufa, $E_{liq,GEE}$, é a diferença entre a soma das emissões evitadas devido a estocagem de carbono, $E_{estoque,C}$, e as emissões evitadas pelos serviços públicos, $E_{mit,pub}$.

Esta equação tem como propósito comparar dois cenários distintos nos quais os resíduos gerados serão enterrados, incinerados, reciclados, compostados, ou digeridos anaerobicamente.

O WARM possui um banco de dados no qual cada rota de destinação de resíduo é avaliada a aquisição da matéria prima a manufatura para se realizar a rota, se há mudanças na florestais ou armazenamento de carbono e o fim de sua vida. Veja o quadro a seguir.

Tabela 14 – Quadro de Estratégias e Emissões

Estratégia	Aquisição e fabricação de matérias-primas	Fim da vida
Combustão	- Emissões de linha de base do processo e do transporte devido à fabricação com a combinação atual de insumos virgens e reciclados	<p>Emissões</p> <ul style="list-style-type: none"> - Transporte para a instalação WTE - Não biogênicas relacionadas à combustão (CO₂ e N₂O) <p>Compensações</p> <ul style="list-style-type: none"> - Emissões evitadas da concessionária de energia elétrica devido à WTE - Fabricação de aço evitada a partir da recuperação de aço na WTE para materiais queimados, incluindo latas de aço, metais mistos, recicláveis mistos, eletrônicos, pneus e RSU misto
Enterramento	- Emissões de linha de base do processo e do transporte devido à fabricação com a combinação atual de insumos virgens e reciclados	<p>Emissões</p> <ul style="list-style-type: none"> - Transporte para o aterro - Uso de equipamentos no aterro - Metano do aterro <p>Compensações</p> <ul style="list-style-type: none"> - Emissões evitadas de serviços públicos devido à conversão de gás de aterro em energia - Armazenamento de carbono no aterro

Fonte: ICF (2020)

Esta equação tem como propósito comparar dois cenários distintos nos quais os resíduos gerados serão enterrados, incinerados, reciclados, compostados, ou digeridos anaerobicamente.

O WARM possui um banco de dados no qual cada rota de destinação de resíduo é avaliada a aquisição da matéria prima a manufatura para se realizar a rota, se há mudanças na florestais ou armazenamento de carbono e o fim de sua vida.

5.4.1 Cenários para o WARM

N aba “Analysis Input”, estão localizados dois campos para se fazer comparações. O primeiro é um cenário base e o segundo um cenário alternativo.

Cada cenário é dividido por tipo de material, e cada tipo tem os seus materiais. Por exemplo, tipo de material é “Papel” e nele possui subdivisões de “jornais”; “revistas”; “livros”; “papel de escritório”, entre outros.

Nos campos azuis são onde é possível destinar o resíduo. “Papel” pode ser reciclado, enterrado e incinerado, mas não pode ser compostado ou digerido anaerobicamente.

Material Type	Material	Tons Recycled	Tons Landfilled	Tons Comusted	Tons Composted	Tons Anaerobically Digerized	Tons Generated	Tons Source Reduced	Tons Recycled	Tons Landfilled	Tons Comusted	Ti
Paper	Corrugated Containers				NA	NA	0.00					
	Magazines/Third-class Mail				NA	NA	0.00					
	Newspaper				NA	NA	0.00					
	Office Paper				NA	NA	0.00					
	Phonebooks				NA	NA	0.00					
	Textbooks				NA	NA	0.00					
	Mixed Paper (general)	3,420.00	114,800.00		NA	NA	118,220.00		3,420.00		114,800.00	
Mixed Paper (primarily residential)				NA	NA	0.00						
Mixed Paper (primarily from offices)				NA	NA	0.00						
Food Waste			531,600.00				531,600.00				531,600.00	

Figura 21 – Tela de recebimento de dados de entrada do WARM

Fonte: captura de tela do Software WARM

5.4.1.1 Cenário base

Conforme a lógica implementada no WARM, foi necessário criar dois cenários bases. O cenário base 1 e o cenário base 2 ambos consideram os resíduos já reciclados e o restante 100% enterrado.

No entanto, existe um pequeno formulário a ser respondido para a contabilização na simulação.

Para o cenário As perguntas 5 e 7 foram configuradas conforme a Figura 22.

5. The emissions from landfilling depends on whether the landfill where your waste is disposed has a landfill gas (LFG) control system. If you do not know whether your landfill has LFG control, select "National Average" to calculate emissions based on the estimated proportions of landfills with LFG control in 2012 and proceed to question 7. If your landfill does not have a LFG system, select "No LFG Recovery" and proceed to question 8. If a LFG system is in place at your landfill, select "LFG Recovery" and click one of the options in 6a to indicate whether LFG is recovered for energy or flared.

National Average
 LFG Recovery
 No LFG Recovery

7. Which of the following moisture conditions and associated bulk MSW decay rate (k) most accurately describes the average conditions at the landfill?
The decay rates, also referred to as k values, describe the rate of change per year (yr⁻¹) for the decomposition of organic waste in landfills. A higher average decay rate means that waste decomposes faster in the landfill.

<input type="radio"/> National average - DEFAULT	Dry (k=0.02)	Moisture condition assumptions
<input type="radio"/> Dry (k=0.02)	Moderate (k=0.04)	Less than 20 inches of precipitation per year
<input type="radio"/> Moderate (k = 0.04)	Wet (k=0.06)	Between 20 and 40 inches of precipitation per year
<input checked="" type="radio"/> Wet (k = 0.06)	Bioreactor (k=0.12)	Greater than 40 inches of precipitation per year
<input type="radio"/> Bioreactor (k = 0.12)	National average	Water is added until the moisture content reaches 40 percent moisture on a wet weight basis
		Weighted average based on the share of waste received at each landfill type

Figura 22 – Perguntas 5 e 7 do questionário do WARM para o cenário base 1

Fonte: captura de tela do Software WARM

Foram selecionadas as opções sem Captura do Gás de Aterro, Taxa de Decaimento k para Wet ($k = 0,06$), das perguntas 5 e 7 respectivamente. As outras opções não foram alteradas.

Para o cenário base 2, a questão 7 se manteve, e as seguintes questões foram alteradas:

5. The emissions from landfilling depends on whether the landfill where your waste is disposed has a landfill gas (LFG) control system. If you do not know whether your landfill has LFG control, select "National Average" to calculate emissions based on the estimated proportions of landfills with LFG control in 2012 and proceed to question 7. If your landfill does not have a LFG system, select "No LFG Recovery" and proceed to question 8. If a LFG system is in place at your landfill, select "LFG Recovery" and click one of the options in 6a to indicate whether LFG is recovered for energy or flared.

National Average
 LFG Recovery
 No LFG Recovery

6a. If your landfill has gas recovery, does it recover the methane for energy or flare it?

Recover for energy
 Flare

Figura 23 – Perguntas 5 e 6a do questionário do WARM para o cenário base 1

Fonte: captura de tela do Software WARM

A questão 5 foi alterada para a opção "LFG Recovery" e a pergunta 6a foi escolhida a "Recovery for energy".

Veja na Tabela 16 os dados de entrada para o cenário base.

Tabela 15 – Quantidades de Materiais Reciclados e Enterrados

Material	Reciclados (Gg)	Enterrados (Gg)
Papel misturado (geral)	34,2	114,8
Resto de comida	-	531,6
Plástico misturado	54,88	152,2
Metal misturado	16,5	15,3
Vidro	-	22,5
Resíduo Misturado	-	67,5

Fonte: Autoria própria

A quantidade de “Outros” foi utilizado como resíduo misturado, enquanto “Rejeitos” não será contabilizado devido a sua não adequação às opções apresentadas. Assim será para os outros cenários.

5.4.1.2 Cenário alternativo

Para o cenário alternativo foram utilizados os resíduos reciclados e o restante, 100% usado para combustão. Os dados de entrada de material foram conforme a tabela a seguir:

Tabela 16 – Quantidades de Materiais Reciclados e Incinerados

Material	Reciclados (Gg)	Incinerados (Gg)
Papel misturado (geral)	34,2	114,8
Resto de comida	-	531,6
Plástico misturado	54,88	152,2
Metal misturado	16,5	15,3
Vidro	-	22,5
Resíduo Misturado	-	67,5

Fonte: Autoria própria

5.4.2 Dados de Saída

Após inserido todos os dados de entrada e feita as configurações iniciais, na aba “Analysis Results (MTCO2E)” aparece o seguinte resultado:

Waste Reduction Model (WARM) -- Results

Total GHG Emissions from Baseline MSW Generation and Management (MTCO ₂ E):	97.167,78
Total GHG Emissions from Alternative MSW Generation and Management (MTCO ₂ E):	(40.140,08)
Incremental GHG Emissions (MTCO ₂ E):	(137.307,85)

MTCO₂E = metric tons of carbon dioxide equivalent

Figura 24 – Tela de resultados do Warm

Fonte: captura de tela do Software WARM

6 Resultados e discussões

6.1 Potencial Elétrico do RSU em Brasília

Em uma análise de um período de 20 anos, foram obtidos os dados da Tabela 11.

Tabela 17 – Dados de energia por tipo de tecnologia para destinação e disposição de RSU

Tecnologia	Quantidade de Combustível	Poder Calorífico	Potência Térmica	Eficiência Elétrica Líquida	Potência Elétrica	Ener Elétri
Incineração	$2,2 \times 10^{10}$ kg	9,8 MJ/kg	340 MW	30%	93 MW	17, (TW
Gaseificação	$8,7 \times 10^9$ kg	17,3 MJ/kg	237 MW	25%	51 MW	10, (TW
Gás de Aterro	$1,31 \times 10^9$ m ³	35,5 MJ/m ³	74 MW	35%	24 MW	4,5 (T

Fonte: Autoria própria

Comparando com as demandas de energia do DF do ano de 2022, temos a seguinte análise:

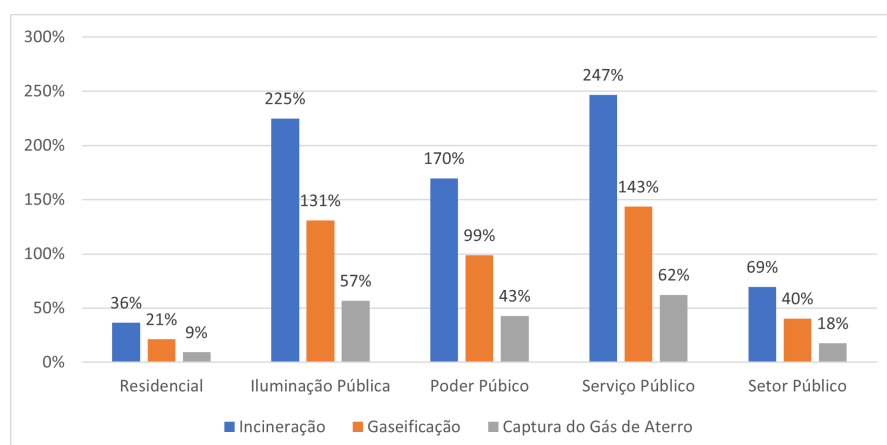


Figura 25 – Potencial atendimento de demanda elétrica do DF com o uso do potencial elétrico dos resíduos sólidos urbanos

Fonte: Autoria própria

A incineração consegue atender quase 70% da demanda do setor público (Iluminação Pública, Poder Público e Serviços Público), enquanto gaseificação fica com 40% e o gás de aterro com 18%.

É possível atender bem a demanda residencial com a incineração com 36%, gaseificação 21% e o gás de aterro 9%, isso considerando a grande quantidade populacional do DF.

Aqui nota-se uma possibilidade em se fazer projetos com o modelo de autoprodução de energia, no qual Brasília em conjunto com outras empresas interessadas poderiam ser donas da usina e usar a energia para si, abatendo o valor pago à distribuidora, sendo uma alternativa aos tradicionais leilões realizadas pela ANEEL.

Analisando a tecnologia da incineração, ela é o cenário no qual gera mais energia. Esse era o resultado esperado, devido à sua boa aceitação ao RSU bruto, sem um pré-tratamento sofisticado, logo maior disponibilidade de combustível. É um indício do motivo para essa tecnologia dominar o cenário mundial atual.

Sobre a gaseificação, dada a grande variedade dos RSU, um pré-tratamento e uma boa coleta seletiva são indispensáveis, ou seja, uma gestão integrada de resí-

duos. Como fazer essa gestão é uma tarefa mais complexa e que depende de vários fatores, a gaseificação de RSU ainda foi pouco explorada. Cabe aqui uma grande oportunidade de investimentos em projetos de pesquisa e desenvolvimento, por exemplo melhorar eficiência dos gaseificadores ou para tornar viáveis tecnicamente o uso da gaseificação para resíduos heterogêneos.

O Gás de Aterro, por sua vez, é fundamental enquanto as alternativas se encontram inviáveis economicamente ou tecnicamente. Nem todas as localidades vão ser aptas a receber uma usina, existem cidades que não possuem demanda de resíduo suficientes que justifiquem o uso de uma incineração e nem possuem uma coleta seletiva e separação do resíduo em um estágio que a gaseificação consiga ser implementada, e mesmo assim, o direito ao saneamento básico à população precisa ser respeitado. Portanto, uma vez em que o aterro sanitário a principal solução para o destino do resíduo, a implementação da captura do gás de aterro para gerar a energia é o melhor caminho a ser seguido.

6.2 Tratamento de resíduos

Um dos principais objetivos do Planares é o desvio de resíduo de aterros, deste modo a incineração e a gaseificação podem ter papel relevantes em cenários em que eles possam ser implementados.

Tabela 18 – Taxa de resíduos tratados por tipo de tecnologia de destinação de RSU

Material	Incineração	Gaseificação
Matéria Orgânica	100%	19%
Papel	97%	97%
Vidro	0%	0%
Plástico	97%	97%
Metal	0%	0%
Outros	100%	99%
Rejeito	0%	0%
Total	80%	39%

Fonte: Autoria própria

A incineração consegue tratar até 80% dos resíduos e a gaseificação até 39%, isso considerando uma parcela de recicláveis no cálculo.

Importante destacar que após a queima do resíduo, em uma incineração o metal pode ser facilmente separado das cinzas com a auxílio de ímãs e o restante 20% que vai para aterro é um resíduo inerte, diminuindo o risco potencial ao meio ambiente. A gaseificação ainda precisará de alguma outra tecnologia aliada, para aumentar a taxa de desvio de resíduo, principalmente em relação ao resíduo orgânico. Mas, ambos conseguem atender a meta 4 do Planares sobre desvio da massa total de RSU de aterros.

No entanto, para que haja realmente um desvio significativo de resíduos e uma otimização da gestão de resíduo, precisa haver uma conscientização da sociedade em se produzir menos resíduos. As metas que são de 2022, caso ao decorrer dos anos a produção de resíduos aumente, essas metas poderão sofrer alterações.

Ao se implementar alternativas de recuperação energética, geralmente as taxas de reciclagem e a coleta seletiva geralmente sobem. Isto deve-se ao fato de que há um processo de valorização do resíduo vinculado ao pagamento da prestação de serviços de saneamento e de serviços ambientais. Algo que era mais vantajoso descartar, passa a ser alvo novos mercados.

6.3 Potencial de mitigação de gases de efeito estufa do setor de resíduos

Utilizando-se dos dados obtidos pelo software WARM, em uma análise de 1 ano de resíduos gerados equivalente ao que foi em 2019, resultou-se nos dados da Tabela 19 e ilustrados na figura 26.

Tabela 19 – Emissões de GEE por tipo de destinação em MTCO₂Eq

Material	Aterro sem Captura do Gás de Aterro	Aterro Com Captura do Gás de Aterro e aproveitamento energético	Incineração
Papel Misturado (Geral)	153.477	-32.331	68.495
Resto de Comida	740.967	193.929	71.373
Plástico Misturado	-1.997	-1.997	186.579
Metal Misturado	-72.144	-72.144	-88.072
Vidro	456	456	604
Resíduo Misturado	85.770	9.254	618
Total	906.529	97.168	-40.140

Fonte: Elaboração própria.

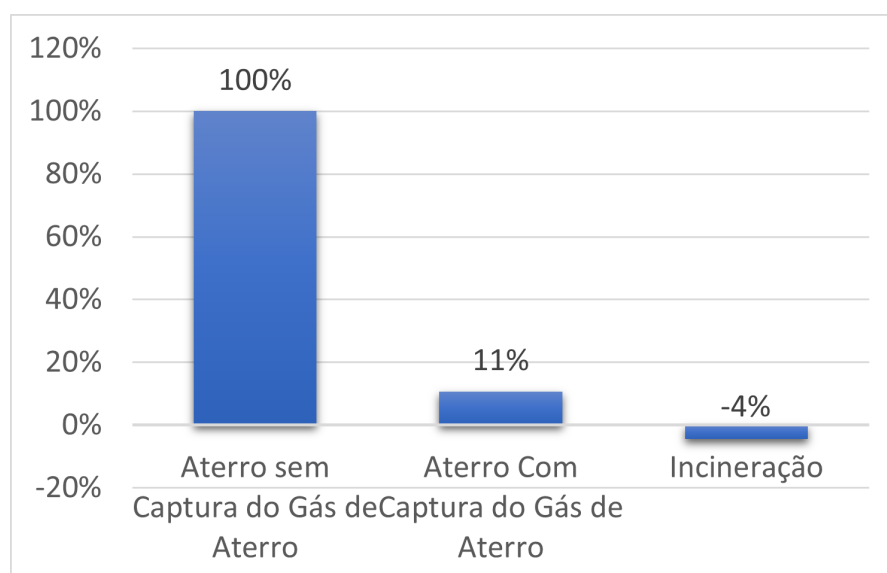


Figura 26 – Potencial de mitigação de gases de efeito estufa no setor de resíduos no DF

Fonte: Autoria própria

O potencial de se reduzir emissões chega a quase 1.000.000 de MTCO₂Eq tanto para o cenário com captura e aproveitamento energético, quanto com incine-

ração com recuperação energética. Chega a ser maior que o setor da agropecuária e mudança de uso da terra e da floresta do DF juntos (SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES, 2023). Veja a figura abaixo:



Figura 27 – Emissões de gases de efeito no DF

Fonte: SEEG - Sistema de Estimativa de Emissão de Gases (2023)

No DF especificamente, a representatividade que tem o setor de resíduos é muito relevante. Sendo o segundo maior emissor, atrás apenas do setor energético.

Na prática ainda haverá algumas emissões no setor de resíduos especificamente, mas em contrapartida, outros setores serão beneficiados, majoritariamente o de energia, substituindo e reduzindo o consumo de combustíveis fósseis. Deste modo, implementando as tecnologias analisadas a redução potencial é quase que o valor total das emissões apenas capturando o gás metano, ou até virar a ser um pequeno “capturador” de gases de efeito estufa com a incineração.

Outro incentivo para a implementação de tecnologias que mitigam gases de efeito estufa é o mercado de carbono. Com os chamados créditos de carbono, soluções que antes eram economicamente inviáveis passam a ser viáveis.

7 Consideração Finais

Por fim, existem algumas considerações sobre os resultados.

Para se calcular e energia dos resíduos, pensou-se também em fazer simulações por exemplo em softwares como o Aspen e EES. Mas, devido às limitações de licenças e tempo hábil para a conclusão do estudo, não foi feito. Portanto, deixa-se a implementação dessa parte para trabalhos futuros.

O poder calorífico, por exemplo, seria mais confiável. Em relatórios de gravimetria encontrados sobre os resíduos de Brasília da ADASA e do SLU, não foi possível localizar esse dado.

O dado sobre o teor de umidade não foi explorado afundo nesse estudo. Buscou-se esse dado em trabalhos de terceiros nos quais apresentavam uma composição semelhante ao do DF.

Já em meio as pesquisas relacionadas a produção de metano em aterros sanitários, deparou-se com a notícia de que havia um software feito pela CETESB inspirado no LandGEM, com uma abordagem orientada ao cenário brasileiro intitulado de BIOGÁS. No entanto, não foi possível utilizá-lo, pois ele não está mais disponível. Logo, optou-se pelo software da EPA, LandGEM.

Outro software utilizado, o WARM, também tem origem americana. As calibrações utilizadas podem não estar de acordo com o cenário brasileiro, tendo em vistas as diferenças de tipagem de resíduos, clima e tipagem de solo que cada país tem. Para os resultados apresentados, não foi estimado uma margem de erro.

8 Conclusão

Os resultados apresentados foram satisfatórios atendendo boa parte do planejado. Pela revisão bibliográfica, o Brasil ainda possui muito poucos estudos publicados em revistas. Enquanto China, lidera as pesquisas, seguido por Estados Unidos e países europeus. No entanto, nos últimos 10 anos, a frequência de estudos publicados por ano vem aumentando em todo o mundo, mostrando uma tendência forte de mercado.

Como objetivo geral, conseguiu-se estimar o potencial elétrico dos resíduos sólidos urbanos para o Distrito Federal. A energia resultante é relevante, conseguindo suprir até 36% da demanda residencial, que representa uma população total de 1 milhão de pessoas, ou quase 70% da demanda do setor público, sendo uma indicação possível a implementação de um modelo em autoprodução.

Sobre a mitigação de gases de efeito estufa, também se conseguiu resultados interessantes. No DF, é possível reduzir de forma drásticas as emissões. Ao se substituir aterros sem captura por aterros com captura ou a implementação da incineração, as emissões líquidas do setor de resíduos podem ser até negativas devido as compensações em outros setores. Ações como estas podem atrair empresas incentivadas a conseguir créditos de carbono, que são formas de se abater as emissões que essas empresas geram, ou obter lucro com a venda para outras empresas. Esses resultados deixam claro a necessidade de se pensar em alternativas a forma em que se faz a destinação final dos resíduos sólidos atualmente no DF. Recursos valorosos estão sendo ignorados a troco de passivos ambientais. Uma análise econômica poderia aqui ilustrar melhor esses prejuízos.

Tecnologias como a gaseificação por exemplo, podem ser incentivadas por meio de projetos de pesquisa e desenvolvimento (PD). Esse tipo de processo já é feito na indústria de forma comercial, mas ainda pouco se sabe sobre a confiabilidade quando é utilizado a gaseificação de resíduo sólido urbano. Com PD, pode ser que a eficiência e/ou a aceitação de resíduos mais heterogêneos aumente, fazendo com que os projetos se tornem mais viáveis.

Todavia, cada caso é um caso. A escolha da tecnologia depende de vários fatores, por exemplo a quantidade de resíduo disponível, se há área que é possível o resíduo ser enterrado e se há coleta seletiva.

Cada tecnologia tem sua importância, desde que sejam alinhadas com a hierarquia de resíduos, e que mesmo que uma seja implementada, pensar qual é o próximo passo. O objetivo então da gestão integrada de resíduos é primeiramente reduzir o resíduo gerado. Se o gerou, reciclá-lo. Se não é possível reciclá-lo, tratá-lo para que ele seja o menos danoso e que se recupere o máximo de recursos antes dele ser finalmente descartado. E, só assim, que o aterro seja opção, para que o rejeito restante seja descartado de forma adequada e que haja a captura dos gases caso exista e que não haja mais lixões a céu aberto.

Por isso que a fase de planejamento do projeto é extremamente importante, para que se previna colapsos e desastres. Geralmente a questão financeira e a urgência de se resolver os problemas a curto prazo são os fatores determinantes para a escolha de uma tecnologia, mas é necessário levar em consideração a vida útil e os pós vida de cada processo.

De forma geral, os objetivos foram concluídos. No entanto, algumas melhorias poderiam ser implementadas.

1. Análise Econômica de cada rota comparando competitivamente com os atuais preços de energia.
2. Fazer gravimetria in loco no Aterro Sanitário de Brasília.
3. Incluir cálculo para o teor de umidade do resíduo do DF.
4. Fazer simulação termoquímica para as rotas tecnológicas
5. Atualizar modelos de emissões de gases de efeito estufa conforme as características locais.
6. Estimar a margem de erro dos resultados

Dito isso, o assunto estudado foi desafiador pois é bem amplo e complexo. É um assunto sobre energia, saneamento e meio ambiente. Ao longo da jornada como

discente e em especial com este trabalho elucidou-se certas dúvidas e desmitificou-se achismos. Entender que um engenheiro, não apenas resolve problemas, mas também faz o plano de como melhor evitá-los e tomar a precaução de que a resolução afete o mínimo exequível a sociedade e o meio ambiente.

Referências

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022*. 2022. Citado na página 31.

ALEXANDER, A.; BURKLIN, C.; SINGLETON, A. *US EPA Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide*. 2005. Citado na página 50.

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

2023. Disponível em: <[https://app.powerbi.com/view?r=](https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI)

[eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI](https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI)

Citado na página 18.

ARENA, U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. a review. *Waste Management*, Pergamon, v. 32, p. 625–639, 4 2012. ISSN 0956-053X. Citado na página 29.

BACCHI, D. et al. Life cycle assessment (lca) of landfill gas management: comparison between conventional technologies and microbial oxidation systems. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 148, p. 1066–1073, 8 2018. ISSN 1876-6102. Citado na página 32.

BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T.; SILVA, T. R. da. The electric energy potential of landfill biogas in brazil. *Energy Policy*, Elsevier, v. 65, p. 150–164, 2 2014. ISSN 0301-4215. Citado 4 vezes nas páginas 32, 49, 50 e 54.

BELGIORNO, V. et al. Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management*, v. 23, p. 1–15, 2003. ISSN 0956053X. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/10868430_Energy_from_Gasification_of_Solid_Wastes>. Citado na página 29.

BERLO, M.; WANDSCHNEIDER, J. *Waste fired power plant the new standard for recovery of sustainable energy, metals and building materials from urban waste*. 2006. Citado na página 58.

BOGALE, W.; VIGANÒ, F. A preliminary comparative performance evaluation of highly efficient waste-to-energy plants. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 45, p. 1315–1324, 1 2014. ISSN 1876-6102. Citado na página 58.

BONOMO, A. *WASTE TO ENERGY IN HIGH EFFICIENCY DISTRICT HEATING. THE EXPERIENCE IN BRESCIA, ITALY*. 2012. Disponível em: <www.cewep.eu>. Citado na página 58.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Citado na página 15.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Citado na página 19.

BRASIL. *Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares*. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

BRASIL. *Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos - 2020*. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/rs>>. Citado na página 18.

CIBIOGAS. *BiogasMap*. 2023. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNDZiYTYyNGQtYzliYS00NTMyLTk1Y2EtOWZmZjE4OTgwY2VkIiwidCI6ImMzOTg3Zm>>. Citado na página 32.

COALITION, C. . C. A. *Methane*. 2023. Disponível em: <<https://www.ccacoalition.org/short-lived-climate-pollutants/methane>>. Citado na página 26.

CORPORATION, W. *Extending the WtE Power Plant Lifespan*. 2023. Disponível em: <<https://woimacorporation.com/extending-the-wte-power-plant-lifespan/>>. Citado na página 28.

DRUDI, K. C. et al. Statistical model for heating value of municipal solid waste in brazil based on gravimetric composition. *Waste Management*, Pergamon, v. 87, p. 782–790, 3 2019. ISSN 0956-053X. Citado na página 36.

ECOPROG. *Waste to Energy 2022/2023*. 2023. Disponível em: <<https://ecoprogram.com/publications/data-wte>>. Citado na página 19.

ESMAP. *Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean*. 2004. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.

FEDERAL, D. Decreto nº 41.693, de 05 de janeiro de 2021. *Diário Oficial do Distrito Federal*, Brasília, DF, 2021. Citado na página 34.

FICHTNER CONSULTING ENGINEERS LTD. *The Viability of Advanced Thermal Treatment of MSW in the UK*. 2004. Citado na página 59.

GUARULHOS. *Lixo Zero*. 2023. Disponível em: <<https://www.guarulhos.sp.gov.br/lixozero/lixozero>>. Citado na página 16.

IBGE. *Cidades e Estados - DF*. 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/df/>>. Citado na página 34.

ICF. *Documentation for Greenhouse Gas Emission and Energy Factors Used in the Waste Reduction Model (WARM) Background Chapters*. 2020. Citado na página 62.

INOVA, H. Z. *Turkish Delight - Europe's largest waste-to-energy plant to be built in Istanbul*. 2017. Disponível em: <<https://www.hz-inova.com/wmw-article-turkish-delight-for-hzi/>>. Citado na página 28.

IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2023. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>. Citado na página 32.

ISWA. *Alternative Waste Conversion*. 2013. Disponível em: <<https://www.iswa.org/knowledge-base/iswa-white-paper-on-alternative-waste-conversion-technologies/?v=19d3326f3137>>. Citado na página 29.

KAZA, S. et al. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. [S.l.]: Washington, DC: World Bank, 2018. ISBN 978-1-4648-1329-0. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.

KOMILIS, D.; KISSAS, K.; SYMEONIDIS, A. Effect of organic matter and moisture on the calorific value of solid wastes: An update of the tanner diagram. *Waste Management*, Pergamon, v. 34, p. 249–255, 2 2014. ISSN 0956-053X. Citado na página 28.

KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, Pergamon, v. 69, p. 407–422, 11 2017. ISSN 0956-053X. Citado na página 29.

LIMA, R. M. et al. Spatially distributed potential of landfill biogas production and electric power generation in Brazil. *Waste Management*, Pergamon, v. 74, p. 323–334, 4 2018. ISSN 0956-053X. Citado na página 50.

- MAASAKKERS, J. D. et al. Using satellites to uncover large methane emissions from landfills. *Science Advances*, American Association for the Advancement of Science, v. 8, 8 2022. ISSN 23752548. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abn9683>>. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 55.
- MADSEN, O. H. et al. High electrical efficiency by dividing the combustion products. In: . [S.l.]: ASMEDC, 2008. p. 51–60. ISBN 0-7918-4293-2. Citado na página 58.
- MAGALHÃES, G. H. C. et al. Understanding methane emissions from passive systems in landfills in brazil: a contribution for reducing the uncertainties concerning the amount of methane recovered (r) in greenhouse gas emission inventories from waste management and for better estimating the parameter adjustment factor (af) in landfill gas collection and destruction/recovering projects under the clean development mechanism (cdm). 2010. Disponível em: <https://cetesp.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/magalhaes_alves_santofilho_costa_kelson.pdf>. Citado na página 55.
- MAKARICHI, L.; JUTIDAMRONGPHAN, W.; TECHATO, K. anan. The evolution of waste-to-energy incineration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, p. 812–821, 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118302855>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.
- NASA. *Methane ‘Super-Emitters’ Mapped by NASA’s New Earth Space Mission - NASA*. 2022. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/jpl/methane-super-emitters-mapped-by-nasas-new-earth-space-mission/>>. Citado na página 55.
- NETO, J. T. D. M. et al. Techno-economic viability analysis of gasification technology as a sustainable alternative for electric power generation from municipal solid waste. *Gestão Produção*, Universidade Federal de São Carlos, v. 28, p. e5756, 10 2021. ISSN 0104-530X. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/gp/a/yzvHGJHkGXqQqkx3fKkjyzP/?lang=en>>. Citado na página 29.
- ONU, A. G. da. O direito humano à água e ao saneamento. Brasília, DF, 2010. Disponível em: <<https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N09/479/35/PDF/N0947935.pdf?OpenElement>>. Citado na página 19.
- PANEPINTO, D. et al. Environmental performances and energy efficiency for msw gasification treatment. *Waste and Biomass Valorization*, Kluwer Academic Publishers, v. 6, p. 123–135, 2 2015. ISSN 1877265X. Citado na página 59.

PSOMOPOULOS, C. S.; BOURKA, A.; THEMELIS, N. J. Waste-to-energy: A review of the status and benefits in usa. *Waste Management*, v. 29, p. 1718–1724, 5 2009. ISSN 0956053X. Citado na página 25.

REZAEI, H. et al. Pelletization properties of refuse-derived fuel - effects of particle size and moisture content. *Fuel Processing Technology*, Elsevier, v. 205, p. 106437, 8 2020. ISSN 0378-3820. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 49.

SANEAMENTO, R. *Planta piloto para aproveitamento energético do biogás – RAC Saneamento – Blog*. 2018. Disponível em: <<https://www.racsaneamento.com.br/blog/planta-piloto-para-aproveitamento-energetico-do-biogas/>>. Citado na página 31.

SCHMITKE, Y. *SANEAMENTO ENERGETICO NO BRASIL - Diagnóstico e Requisitos para Viabilização de Projetos de Valorização Energética de Resíduos*. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

SCHMITKE, Y. *SANEAMENTO ENERGETICO NO BRASIL - Apresentação institucional ABREN*. 2023. Citado na página 25.

SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES. *Emissões Totais*. 2023. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission>. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 72.

SEPE. *Ecoparques*. 2021. Disponível em: <<https://www.sepe.df.gov.br/ecoparques/>>. Citado na página 20.

SEPE. *Estudos de modelagem / Consulta e audiência pública – Secretaria de Estado de Projetos Especiais*. 2021. Disponível em: <<https://www.sepe.df.gov.br/concessao-do-aterro-sanitario-de-brasilia/>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 32.

SERENCO. *ESTUDO GRAVIMÉTRICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DO DISTRITO FEDERAL*. 2017. Disponível em: <<https://www.so.df.gov.br/plano-distrital-de-saneamento-basico-e-de-gestao-integrada-de-residuos-solidos-pdsb-e-pdgirs/>>. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 56.

SHI, H. et al. Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste. *Waste Management*, Pergamon, v. 48, p. 34–47, 2 2016. ISSN 0956-053X. Citado na página 36.

SILVA, C. P. da. Avaliação do impacto da propulsão elétrica e do sistema brt no consumo energético e emissão de co2 no transporte público no distrito federal. 7 2020. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/38732>>. Citado na página 39.

SINIR+. *Relatório Estadual de Gestão de Resíduos Sólidos*. 2021. Disponível em: <<https://www.sinir.gov.br/relatorios/estadual/>>. Citado 4 vezes nas páginas 34, 35, 36 e 37.

SINIR+. *Resíduos Sólidos Urbanos*. 2023. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-urbanos/>>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

SLU. Relatório anual 2021. 2022. Citado na página 34.

SLU. *Aterro Sanitário de Brasília inicia operação em novas etapas*. 2023. Disponível em: <<https://www.slu.df.gov.br/aterro-sanitario-de-brasilia-inicia-operacao-em-novas-etapas/>>. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 50.

SUBSTANCES, A. F. T.; ASTDR, D. R. Landfill gas basics. In: _____. 1. ed. ASTDR, 2001. Disponível em: <<https://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/intro.html>>. Citado na página 32.

SUN, C.; MENG, X.; PENG, S. Effects of waste-to-energy plants on china's urbanization: Evidence from a hedonic price analysis in shenzhen. *Sustainability 2017, Vol. 9, Page 475*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, p. 475, 3 2017. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/9/3/475/htmhttps://www.mdpi.com/2071-1050/9/3/475>>. Citado na página 28.

THEMELIS, N. J.; ULLOA, P. A. Methane generation in landfills. *Renewable Energy*, Pergamon, v. 32, p. 1243–1257, 6 2007. ISSN 0960-1481. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 33.

WANG, B. et al. A review on gasification of municipal solid waste (msw): Syngas production, tar formation, mineral transformation and industrial challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, Pergamon, v. 48, p. 26676–26706, 8 2023. ISSN 0360-3199. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 36.

WANG, Z.; GENG, L. Carbon emissions calculation from municipal solid waste and the influencing factors analysis in china. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 104, p. 177–184, 10 2015. ISSN 0959-6526. Citado na página 31.

WORLD ENERGY COUNCIL. *World Energy Resources | 2016*. 2016. Disponível em: <<https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>>. Citado na página 56.

XU, C. C. et al. Biomass energy. In: _____. [S.l.]: Elsevier, 2018. v. 1-5, p. 770–794. ISBN 9780128095973. Citado na página 29.

YANG, Y. et al. Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review. *Environmental Chemistry Letters* 2021 19:3, Springer, v. 19, p. 2127–2140, 1 2021. ISSN 1610-3661. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-020-01177-5>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 49.

ZHANG, C. et al. An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in europe. *Science of The Total Environment*, Elsevier, v. 803, p. 149892, 1 2022. ISSN 0048-9697. Citado na página 26.

ZHOU, H. et al. An overview of characteristics of municipal solid waste fuel in china: Physical, chemical composition and heating value. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Pergamon, v. 36, p. 107–122, 8 2014. ISSN 1364-0321. Citado na página 36.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 5. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Science, 2005. 1-988 p. ISBN 0073107689. Citado 3 vezes nas páginas 54, 56 e 57.