

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
COLEGIADO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

PAULO JOÃO DA SILVA NETO

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS EFEITOS DO TRATAMENTO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS POR PROCESSOS TÉRMICOS
COMO ALTERNATIVA PARA MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE
GASES DE EFEITO ESTUFA EM COMPARAÇÃO COM A QUEIMA DE
COMBUSTÍVEIS PARA FINS ENERGÉTICOS**

**VITÓRIA
2023**

PAULO JOÃO DA SILVA NETO

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS EFEITOS DO TRATAMENTO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS POR PROCESSOS TÉRMICOS
COMO ALTERNATIVA PARA MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE
GASES DE EFEITO ESTUFA EM COMPARAÇÃO COM A QUEIMA DE
COMBUSTÍVEIS PARA FINS ENERGÉTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental, do
Centro Tecnológico da Universidade Federal do
Espírito Santo – *campus* de Goiabeiras, como
requisito para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. DSc. Renato Ribeiro Siman.

VITÓRIA

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, por toda dedicação e paciência para que eu chegasse nesta importante etapa da minha vida.

Ao meu orientador Prof. DSc. Renato Ribeiro Siman., pois sem sua ajuda e orientação esse projeto não seria concluído, agradeço principalmente sua dedicação e paciência para ensinar e direcionar sempre que necessário.

Agradeço aos professores do departamento por contribuírem com meu aprendizado ao longo destes anos.

Não poderia deixar de agradecer ao Léo, secretário da coordenação do curso, por sempre esclarecer dúvidas e auxiliar quanto às questões burocráticas do curso.

Por fim, deixo o meu agradecimento a todos meus amigos que tornaram esses anos mais agradáveis e leves mesmo durante períodos turbulentos.

RESUMO

A sociedade vem gerando cada vez mais resíduos sólidos a cada ano, e de acordo com as projeções, esse número só tende a aumentar. Esse cenário traz também a necessidade de uma gestão mais eficiente para criar alternativas de destinação para os resíduos sólidos urbanos (RSU), uma vez que, além dos problemas já amplamente conhecidos, temos também o aumento da geração de gases de efeito estufa liberados nos processos de tratamento, que em sua maior parte, são aterros sanitários. Nesse contexto, o presente trabalho busca analisar a partir de revisões bibliográficas da geração de gases de efeito estufa (GEE) a partir de tratamentos térmicos de resíduos sólidos urbanos, que além de minimizar a emissão de GEE em aterros sanitários, podem contribuir como fonte de energia. Com isso, se concluiu que existem formas de produzir energia de maneira mais limpa, emitindo menos GEE com resíduos sólidos urbanos utilizando processos térmicos e que o carvão mineral, mesmo sendo um combustível fóssil amplamente utilizado, se mostrou como uma alternativa muitas vezes pior que utilizar RSU para gerar energia.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos, Emissão de Gases de Efeito Estufa, Waste-to-Energy, Processos Térmicos, Incineração, Pirólise, Gaseificação, Aproveitamento de Energia, Carvão Mineral, Diesel, Energia Hidráulica

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Cálculo de Quantidade de CO _{2eq} através do GWP dos gases	32
Equação 2 – Cálculo da geração média de RSU por dia	34
Equação 3 – Cálculo da Geração de GEE por tonelada de RSU	34
Equação 4 – Cálculo da emissão média de GEE por dia	35
Equação 5 – Cálculo da geração de GEE por unidade de energia produzida	37
Equação 6 – Cálculo da energia produzida a partir de uma determinada eficiência através do PCI	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Porcentagens das formas de destinação de RSU na América Latina.	16
Gráfico 2 – Porcentagens das formas de destinação de RSU na Europa	19
Gráfico 3 – Matrizes energéticas internacionais no ano de 2020	24
Gráfico 4 – Matrizes energéticas nacionais no ano de 2021	25
Gráfico 5 – Quantidade de plantas de recuperação de energia por RSU na china entre 2011 e 2018	26
Gráfico 6 – Variação de PCI em 6 diferentes cenários de composição de RSU	29
Gráfico 7 – Emissão de GEE em (tCO _{2eq} /tRSU) por processo/combustível	48
Gráfico 8 – Gráfico de barras de mínimo e máximo de produção de energia em cada processo com RSU e combustível com a eficiência do motor de combustão de 23%	50
Gráfico 9 – Gráfico de barras de mínimo e máximo de produção de energia em KWh em cada processo com RSU e combustível com a eficiência do motor de combustão de 30%	51
Gráfico 10 – Gráfico de barras ilustrando a dimensão da produção máxima e mínima de tonelada de CO _{2eq} por unidade de MWh produzido nos diferentes processos térmicos e fontes energéticas convencionais utilizando um motor de eficiência de 23%	53
Gráfico 11 – Gráfico de barras ilustrando a dimensão da produção máxima e mínima de tonelada de CO _{2eq} por unidade de MWh produzido nos diferentes processos térmicos e fontes energéticas convencionais utilizando um motor de eficiência de 30%	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Diferenças de temperatura, oxigênio e produtos gerados de cada processo térmico de acordo com VAISH et al. (2016).	18
Quadro 2 – Diretrizes da pesquisa para o trabalho e revisão bibliográfica	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – PCI de diferentes materiais em MJ/Kg	27
Tabela 2 – Variações de PCI em diferentes cenários e produção de energia com 23% e 30% de eficiência	28
Tabela 3 – Potencial de aquecimento global dos gases de efeito estufa em CO ₂ Equivalente	32
Tabela 4 – emissão de CO _{2 eq} por tonelada de RSU em cada processo térmico	35
Tabela 5 – Produção de energia por unidade de peso de RSU para uma eficiência de 23%	37
Tabela 6 – Produção de energia por unidade de peso de RSU para uma eficiência de 30%	37
Tabela 7 – Relação de emissão de gases de efeito estufa por unidade de energia em MWH para processos térmicos de RSU para uma eficiência de 23%	38
Tabela 8 – Relação de emissão de gases de efeito estufa por unidade de energia em MWH para processos térmicos de RSU para uma eficiência de 30%	38
Tabela 9 – Emissão de CO _{2 eq} por tonelada de combustíveis fósseis	40
Tabela 10 – PCI de diferentes amostras de carvão mineral	41
Tabela 11 – PCI de diferentes amostras de óleo diesel	41
Tabela 12 – Produção de energia por unidade de peso de combustível para uma eficiência de 23%	43
Tabela 13 – Produção de energia por unidade de peso de combustível para uma eficiência de 30%	43
Tabela 14 – Relação de emissão de gases de efeito estufa por unidade de energia em MWH para combustíveis fósseis para uma eficiência de 23%	43
Tabela 15 – Relação de emissão de gases de efeito estufa por unidade de energia em MWH para combustíveis fósseis para uma eficiência de 30%	43
Tabela 16 – Emissões de GEE por cada referência, processo e material utilizado	47
Tabela 17 – Mínimo e máximo de produção de energia em cada processo com RSU e combustível com a eficiência do motor de combustão de 23%	50
Tabela 18 – Mínimo e máximo de produção de energia em cada processo com RSU e combustível com a eficiência do motor de combustão de 30%	51
Tabela 19 – Produção máxima e mínima de tonelada de CO _{2eq} por unidade de MWh produzido nos diferentes processos térmicos e fontes energéticas convencionais utilizando um motor de eficiência de 23%	53
Tabela 20 – Produção máxima e mínima de tonelada de CO _{2eq} por unidade de MWh produzido nos diferentes processos térmicos e fontes energéticas convencionais utilizando um motor de eficiência de 30%	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO DA LITERATURA	15
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	15
3.2 PROCESSOS TÉRMICOS PARA TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	18
3.2.1 Incineração	18
3.2.2 Gaseificação	20
3.2.3 Pirólise	21
3.3 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE RSU	22
4 METODOLOGIA	30
4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO DE DADOS DE GERAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E DE ENERGIA POR UNIDADE DE PESO DE RSU EM FUNÇÃO DA DESTINAÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS ATRAVÉS DE PROCESSOS TÉRMICOS	30
4.1.1 Seleção de processos a serem avaliados	31
4.1.2 Geração de Gases de Efeito Estufa	31
4.1.3 Cálculo da Quantidade de Resíduos (t/dia)	33
4.1.4 Cálculo do Rendimento de GEEs por Toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos	34
4.1.5 Elaboração da Tabela para RSU em Processos Térmicos	35
4.1.6 Levantamento da Taxa de Geração de Energia por Unidade de Peso de RSU	36
4.2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO DE DADOS DE GERAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E DE ENERGIA POR UNIDADE DE PESO DE RSU ATRAVÉS DE FONTES DE ENERGIA CONVÊNCIONAIS.	39
4.2.1 Geração de GEE's/t de Combustível: IPCC	39
4.2.2 Geração de Energia por Tonelada de Combustível	40
4.2.3 Energia de Fonte Hidráulica	44

4.3 AVALIAR DE MANEIRA COMPARATIVA OS PROCESSOS TÉRMICOS E AS FONTES DE ENERGIA	44
4.3.1 Geração de GEE	44
4.3.2 Geração de Energia	45
4.3.3 Relação de Emissões por Geração de Energia	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1 TAXA DE GERAÇÃO DE GEE POR TONELADA DE RESÍDUO E COMBUSTÍVEIS	47
5.2 TAXA DE GERAÇÃO DE ENERGIA POR TONELADA DE RESÍDUO OU COMBUSTÍVEL	49
5.3 GERAÇÃO DE GEE POR UNIDADE DE KWH GERADO	52
6 CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A partir do crescimento populacional ao longo dos anos no planeta Terra, algumas consequências andam em conjunto com esse crescimento, tais como o aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) e o aumento da demanda energética, sendo necessário trazer soluções para essas questões, como uma gestão estratégica e eficiente desses recursos (Cruz, 2023).

A fim de trazer dados sobre uma dessas demandas crescentes, o caso dos RSU, de acordo com a ABRELPE (2021), estudos que foram feitos em 2020 no Brasil, demonstraram uma geração de aproximadamente 82,5 milhões de toneladas de RSU, que ao converter isso para média diária por habitante, esse valor ficou em 1,07kg.

Outro dado complementar vem de estudos da EPE (Empresa de Pesquisa Energética), na qual em 2021, demonstrou que no ano de 2020, o consumo de energia cresceu em 4,05% quando comparado ao ano de 2019 e a capacidade total de instalações que geram energia aumentou no mesmo período em 3,93%, gerando um déficit de 0,07% (EPE, 2021)

Uma questão adicional que surge a partir das demandas energéticas e gerações de RSU é o aquecimento global, no qual vem sendo potencializado pelas ações antrópicas, interferindo no efeito estufa por diversos motivos, sendo alguns desses, a queima de combustíveis fósseis e a decomposição de resíduos sólidos em aterros sanitários e outras formas de disposições inadequadas. Os gases geralmente mais gerados pela decomposição dos RSU são o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂) e gás metano (CH₄) (Luiz, 2022).

Dessa forma, emerge uma questão cada vez mais recorrente na sociedade e no mundo, que é a necessidade da produção de energia limpa devido a grandes impactos gerados pelos combustíveis fósseis e com essa necessidade surgem alternativas, como a energia eólica, solar e a energia gerada a partir de RSU, na qual gera uma melhoria no tratamento dos resíduos, reduzindo problemas de quantidade e destinação, processos que podem transformar os RSU em energia, como por exemplo a incineração, gaseificação e pirólise (Faria *et al.*, 2023).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é, com uma revisão bibliográfica de diferentes estudos, coletar dados e criar análises para efeito comparativo de emissões de gases de efeito estufa e produção energética a partir dos processos térmicos avaliados, que serão: incineração, gaseificação e pirólise de resíduos sólidos urbanos, comparando-os entre si e outras fontes convencionais de geração de energia, como diesel, carvão mineral e energia hidráulica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar as emissões de gases de efeito estufa e a viabilidade energética dos resíduos sólidos urbanos a partir de processos térmicos, como a incineração, gaseificação e pirólise, comparando-os a fontes convencionais, como diesel, carvão mineral e energia hidráulica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para a consecução do objetivo geral foram estabelecidos os seguintes Objetivos específicos:

1. Levantamento bibliográfico de dados de rendimento de gases de efeito estufa e energia por unidade de peso de RSU através dos processos térmicos de incineração, gaseificação e pirólise e das fontes de energia hidráulica, carvão mineral e diesel.
2. Adaptar dados de rendimento de GEE e energia entre as alternativas escolhidas para calcular parâmetros para efetuar as análises.
3. Avaliar de maneira comparativa os processos térmicos e as fontes de energia em potencial de geração de GEE, aproveitamento energético e na relação de emissões de gases por geração de energia.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Segundo a NBR 15849 ABNT (2010), a definição de RSU (resíduos sólidos urbanos) é: resíduo que, em similaridade com o que foi definido na Resolução CONAMA 404/2008 (que estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário para esse tipo de resíduo), sejam originários de domicílios, serviços de limpeza urbana, micros estabelecimentos comerciais, industriais e de fornecimento de trabalhos, que se encontra integrados no serviço de coleta regular de resíduos.

A NBR 10004 diz que esses resíduos possuem em sua composição principalmente plástico, papel, papelão, vidros, metais, têxteis, restos de comidas, podas de árvores, resíduos de jardins e resíduos agrícolas. Assim, pode-se observar que há ocorrência de materiais passíveis de reciclagem/transformação, que são importantes para melhorar o aproveitamento energético dos recursos podendo produzir energia por meio de processos térmicos, biológicos ou químicos. Além disso, são gerados em grandes quantidades; é estimado que a geração mundial de RSU atinja 2 bilhões de toneladas até 2025 (Kaza *et al.*, 2018).

Observando o cenário internacional da China, que vem se expandindo economicamente e aumentando significativamente sua população, o desafio torna-se cada vez mais expressivo, quando relacionado ao gerenciamento de resíduos, que atinge níveis sem precedentes, em 2016, o país testemunhou a produção de mais de 180 milhões de toneladas de resíduos sólidos municipais (RSU) (Prevention, 2017), ou seja, mais que o dobro do Brasil em 2019. Esta tendência ainda persiste, com uma taxa de crescimento anual que varia entre 8% e 10% (Zhao *et al.* 2016).

Essa escalada na produção de RSU na China é notável, pois os RSU do país representam uma parcela significativa do volume total de RSU em todo o mundo, atingindo a marca de 29% (Zhang *et al.* 2010). Esses números demonstram a magnitude do problema enfrentado pelas autoridades chinesas no que diz respeito ao tratamento adequado de resíduos.

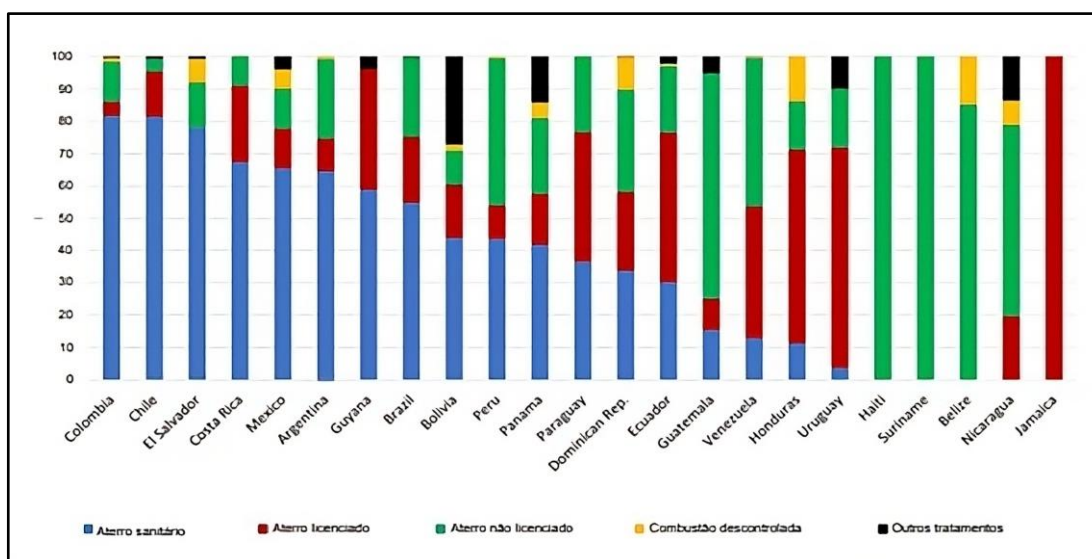
A complexidade da situação é ainda mais evidente quando se consideram as perdas econômicas associadas ao tratamento inadequado dos RSU na China. Segundo Zhao *et al.* (2016), foi estimado que essas perdas econômicas ultrapassam a impressionante marca de 1,467 bilhões de dólares, refletindo a gravidade do problema no âmbito financeiro também.

A forma de destinação final de RSU globalmente mais utilizada é através da disposição final no solo, afinal 45% dos resíduos são encaminhados para algum tipo de aterro sanitário, enquanto 33% em lixões (Kaza *et al.*, 2018). No Brasil, esse número de disposição no solo é ainda maior, sendo 60,5% dispostos em aterros sanitários e 39,5% em lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2022).

A norma NBR 8419 ABNT (1992) traz o seguinte conceito para essa forma de tratamento: método de distribuição de RSU no solo, sem proporcionar problemas à segurança e à saúde pública, diminuindo os danos ambientais, técnica essa que usa conceitos de engenharia para restringir os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor tamanho que permita sua permeabilidade, cobrindo-os com uma camada de terra sempre que concluída a jornada diária de trabalho, ou em tempo mais curto se preciso.

O gráfico 1 demonstra essa predominância de uso de aterros como solução para RSU, no cenário latino-americano, incluindo o Brasil.

Gráfico 1 – Porcentagens das formas de destinação de RSU na América Latina.



Fonte: ABRELPE (2019) e Margallo *et al.* (2019).

Segundo a pesquisa realizada por Fernandes (2011) no município de Inconfidentes - MG, ao analisar a produção de gás em um lixão, foi constatado que, em média, cada tonelada de resíduos sólidos urbanos (RSU) depositada resulta na emissão de aproximadamente 200 metros cúbicos de metano. Uma alternativa viável para lidar com essa emissão de metano é sua utilização na geração de energia elétrica por meio da queima controlada. Esse processo de queima do CH_4 apresenta vantagens, uma vez que, em comparação com o CO_2 liberado no processo, o metano ocupa uma posição de destaque devido ao seu potencial de aquecimento global mais de 28 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO_2) ao longo de um período de 100 anos (Godoy, 2013). A decomposição anaeróbica de resíduos sólidos em aterros sanitários é uma das principais fontes de emissão de metano no setor de resíduos sólidos, o que de certa forma, traz um olhar mais voltado para processos de tratamento térmico como alternativa possível.

Conforme informações apresentadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), aproximadamente 5% das emissões totais de gases de efeito estufa no mundo estão associadas à administração de resíduos sólidos urbanos. Adicionalmente, a atividade de queima de resíduos em lixões e aterros, além de resultar em poluição atmosférica, pode impactar negativamente a saúde das comunidades próximas, representando um considerável risco para a qualidade do solo e até mesmo para o lençol freático de uma determinada região (IPCC, 2023).

A fim de fortalecer a administração e a adequação de tecnologias aplicáveis ao manejo de resíduos sólidos, a Lei Federal nº 12.305/2010 foi promulgada, estabelecendo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Conforme estipulado pela PNRS, as diretrizes estabelecidas incluem priorizar a proteção da saúde pública e a preservação da qualidade ambiental na gestão de resíduos sólidos, promover o desenvolvimento da indústria de reciclagem, adotar tecnologias para minimizar os impactos adversos dos resíduos sólidos, incentivar a criação de sistemas otimizados de gerenciamento de resíduos sólidos e abranger a recuperação de energia a partir desses resíduos.

De acordo com COMLURB (2005) e Chang e Pires (2015), a análise gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é um elemento crucial para assegurar a eficácia do planejamento, concepção e funcionamento de um sistema de gerenciamento de resíduos. Isso se deve à variação das características físicas e químicas, dependendo do tipo de material. Ademais, é relevante salientar que as informações relativas às

quantidades de RSU gerados e em circulação no sistema constituem aspectos fundamentais para o desenvolvimento, operacionalização e aprimoramento dos sistemas de gestão de resíduos (Dehghanifard; Dehghani, 2018; Ghinea *et al.*, 2016).

3.2 PROCESSOS TÉRMICOS PARA TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Segundo VAISH *et al.* (2016) os processos térmicos de incineração, gaseificação e pirólise se resumem a partir das características apresentadas no Quadro 1:

Quadro 1 – Diferenças de temperatura, oxigênio e produtos gerados de cada processo térmico de acordo com VAISH et al. (2016).

Parâmetros/Processos	Incineração	Pirólise	Gaseificação
Temperaturas	850 °C	> 750 °F (400-600°C)	1000 °F – 2800 °F (540°C 1540°C)
Oxigênio	Quantidade suficiente de oxigênio	Ausência total de oxigênio ou baixíssimo quantitativo.	Fornecimento limitado de oxigênio
Produtos Gerados	Cinzas	Gás sincrônico com carvão e cinzas	O produto é gás sintético

Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.1 Incineração

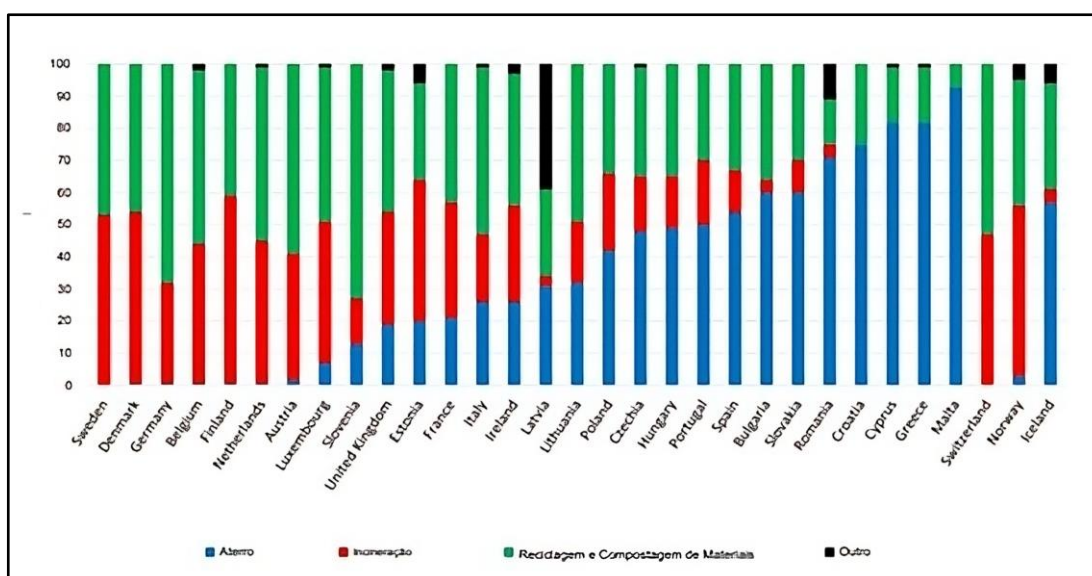
De acordo com Brito (2013) O processo de incineração tem como fim transformar o RSU em cinzas, gases de combustão e calor, no qual gera uma energia térmica, na qual pode ser convertida em energia elétrica.

A parte sólida remanescente após a incineração, que varia entre 4% e 10% do volume original do material, ela passa por esterilização e inertização (Castro, 2015).

Esse é um processo térmico bem utilizado mundialmente, principalmente pela União Europeia, na qual experimentou uma evolução significativa nos anos de 1996 até 2010 de 13,5% do tratamento de RSU para 22% (EUROSTAT, 2014).

A partir de dados mais recentes (EUROSTAT, 2020), o gráfico 2 demonstra a proporção dessas instalações para tratamento de RSU.

Gráfico 2 – Porcentagens das formas de destinação de RSU na Europa.



Fonte: EUROSTAT (2020).

Conforme informações fornecidas pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o Brasil contava com aproximadamente 20 unidades de incineração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em funcionamento no ano de 2021. Essas instalações têm a capacidade de processar diariamente mais de 3 mil toneladas de resíduos, resultando na geração de uma quantidade significativa de energia elétrica. Essa energia gerada tem o potencial de suprir as necessidades de eletricidade de inúmeras residências (ABRELPE, 2021).

Silva *et al.* (2020) demonstra que a geração de RSU está diretamente ligada à capacidade de geração de eletricidade a partir da incineração; assim, é possível

estimar o potencial de geração de uma determinada localidade simplesmente associando sua população (ver Tabela 10, com base em Silva *et al.*, 2020).

A incineração gera gases, que necessitam ser tratados por um sistema de filtragem a fim de remover poluentes como dioxinas e furanos. O sistema de filtragem é composto por uma série de dispositivos, incluindo lavadores de gases, filtros de mangas e catalisadores. Esses componentes desempenham um papel fundamental em assegurar que os gases emitidos pela usina estejam em conformidade com os padrões estabelecidos pela legislação ambiental vigente (Selhorst, 2023).

As tecnologias de recuperação de energia de RSU mais utilizadas são: gases de aterro sanitário, digestão anaeróbica e a incineração em massa. Os gases de aterro sanitário podem ser uma alternativa para países em desenvolvimento que ainda estão em transição de aterros e lixões não licenciados para aterros sanitários, devido ao seu baixo custo, em comparação com outras tecnologias (Galavote et al, 2022).

3.2.2 Gaseificação

A gaseificação, um processo que envolve a oxidação parcial de materiais carbonáceos sólidos ou semissólidos, como biomassa, resíduos e carvão, ocorre a temperaturas moderadas e pressões variáveis. Nesse método, um agente gaseificante, que pode ser ar, vapor d'água ou gás carbônico, reage com o material para gerar um gás combustível. A etapa de gaseificação se divide essencialmente em duas fases. Na primeira fase, os gases combustíveis são gerados, e na segunda, esses gases podem ser aproveitados para gerar potência térmica ou elétrica (Hernández; Ballesteros; Aranda, 2013).

A gaseificação de resíduos sólidos urbanos (RSU) fornece uma solução integrada para gestão de resíduos e recuperação de energia. Vários estudos foram realizados para a gaseificação de RSU e diversas misturas, a fim de projetar uma solução

sustentável. Vários projetos de gaseificadores foram propostos para o processo de gaseificação eficiente (Sajid, 2022).

Ao contrário da incineração, a gaseificação oferece a vantagem de permitir um tratamento e purificação prévia dos gases resultantes antes da combustão. Isso implica que esses gases podem ser queimados em um equipamento subsequente, como um motor de combustão interna ou uma caldeira/turbina, após passarem por um processo de limpeza. Essa limpeza dos gases é crucial, pois elimina substâncias precursoras de poluentes perigosos, como dioxinas e furanos, contribuindo para a redução dos impactos ambientais. (Lora *et al.*, 2008).

Resumidamente, de acordo com Sánchez (2010), a gaseificação é um processo que transforma o RSU em gases de síntese.

3.2.3 Pirólise

De acordo com Figueiredo (2011), a pirólise é um processo que consiste na degradação térmica sem a necessidade de um agente oxidante.

A milhares de anos a pirólise é um processo utilizado para produzir carvão vegetal a partir de biomassa, como madeira. Na gestão de resíduos, esses processos transformam o RSU em combustíveis e substâncias inertes, e assim, de acordo com as condições do processo, esse combustível se traduz em carvão sólido, gás ou produto líquido, sendo assim, o reator de pirólise um conversor eficaz de resíduos em energia (Dezhen, 2014).

Os resíduos pirolisados são inertes, do ponto de vista microbiológico, e podem ser dispostos, com segurança, sem geração significativa de lixiviados e formação de gases, se aterrados (Castro, 2015).

Recentemente, a pirólise de RSU está recebendo cada vez mais atenção em pequenas cidades e vilas devido ao desejo de evitar viagens de longa distância transporte e também é se destaca para grandes cidades como um método de

tratamento de RSU devido à maior dificuldade em encontrar novos locais para incineradores e aterros (Dezhen, 2014).

3.3 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE RSU

A emissão de GEE proveniente de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é uma das fontes antrópicas mais importantes e está se tornando um desafio global com o rápido aumento da quantidade dos resíduos (Lou *et al.*, 2017).

A China se tornou o maior país em geração de RSU no mundo, respondendo por cerca de 13% da geração global de RSU (Hong *et al.*, 2017). A quantidade de geração de RSU foi de 215,2 Mt (milhões de toneladas) em 2017 t que foi 28 vezes maior que a quantidade em 1949 (7,5 Mt) (Instituto Nacional de Estatística, 2018). Estima-se que a emissão total de GEE do setor de RSU aumentou mais de 200 vezes, de 0,36 Mt em 1949 para 72,4 Mt em 2013 (Lou *et al.*, 2017). Dessa forma, se faz urgente explorar o potencial de mitigação em setor de tratamento de RSU e identificar caminhos viáveis para a gestão sustentável de RSU com baixo teor de carbono.

A disposição de RSU no Brasil é predominantemente feita em aterros sanitários, com altos teores de matéria orgânica em sua composição, de acordo com os estudos realizados nos países do bloco econômico BRICS (Singh *et al.*, 2018).

Sob a perspectiva do impacto ambiental, a destinação de resíduos para aterramento, mesmo quando direcionados para aterros sanitários, representa o cenário mais desfavorável para a disposição de resíduos sólidos urbanos, especialmente no que diz respeito à emissão de gases de efeito estufa (IQBAL *et al.*, 2019; Moulton *et al.*, 2018).

Décadas de expansão econômica resultaram em diversas práticas de gestão inadequadas em relação aos resíduos sólidos urbanos, que atualmente demandam a implementação urgente de medidas devido à presença de materiais orgânicos de fácil biodegradação. Isso tem contribuído para um aumento nas emissões de gases de

efeito estufa (GEE) (Yaman *et al.*, 2020), afinal, esses materiais quando destinados para aterros geram cerca de 60% de gases CH₄ (Jha *et al.*, 2008).

Compreender essas emissões constitui o ponto de partida fundamental para a implementação de ações destinadas à sua redução, além de servir de base para a formulação de estratégias climáticas e planos de adaptação (CNM, 2021).

Na participação da COP 21 e na COP 24, o Brasil, junto aos países do BRICS, comprometeu-se com uma redução de 37% nas suas emissões de GEE até 2025, ou seja, abaixo dos níveis registrados em 2005 (MMA, 2016).

De acordo com a pesquisa conduzida por Pérez *et al.* (2021), a transição do tratamento de resíduos de aterros sanitários para a incineração emergiu como uma estratégia eficaz na diminuição das emissões totais de gases de efeito estufa (GEE), resultando em uma redução de 11,3%. Além disso, a adoção de práticas de reciclagem e triagem de resíduos sólidos urbanos (RSU) também foi identificada como um fator fundamental para a mitigação das emissões de GEE, desempenhando um papel significativo na redução das emissões de GEE, na prevenção da chuva ácida e no controle das emissões de dioxinas (Ying Li; Sumei Zhang; Chao Liu, 2022).

Na Suécia, foram estabelecidas medidas para a gestão de resíduos que incluem a imposição de taxas para a disposição em aterros, restrições à deposição de resíduos combustíveis e resíduos orgânicos em aterros e a introdução de regulamentos para controlar as emissões atmosféricas. Essas iniciativas permitiram a avaliação positiva dos processos termoquímicos, tais como gaseificação, pirólise e, de maneira especial, a incineração, como fontes de energia mais ambientalmente amigáveis (Cardoso, 2019)

3.4 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO A PARTIR DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Conforme indicado por Smil (2017), o consumo significativo de energia é uma ocorrência recente na trajetória histórica da humanidade. O uso de combustíveis

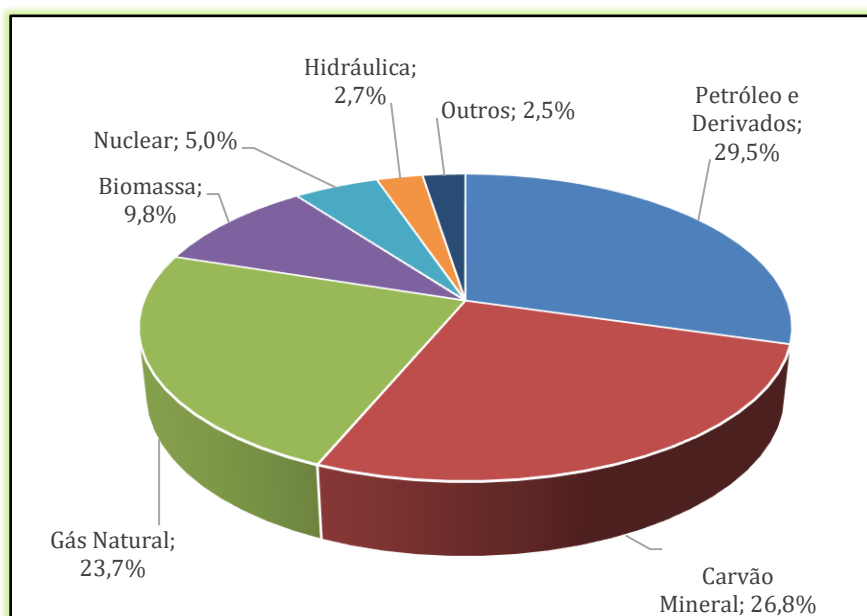
fósseis para a produção de eletricidade deu origem a uma nova forma de civilização caracterizada por uma elevada demanda de energia, cujo alcance já se estendeu de várias maneiras por todo o globo. Como resultado, a operação da sociedade atualmente depende de um suprimento crescente e contínuo de energia.

Existem desafios significativos na dinâmica do setor energético que afetam a sociedade em diversos aspectos. Em termos ambientais, a crescente demanda por energia tem resultado na emissão de gases poluentes, desempenhando um papel central na crise climática atual. Esta situação tem impulsionado a necessidade de uma transição energética em direção a fontes renováveis (IPCC, 2021).

Além disso, a centralização do fornecimento de energia tem implicações geopolíticas, uma vez que cria uma dependência considerável de outros países para garantir o suprimento de energia, o que por vezes afeta a dinâmica econômica energética. Além disso, existe uma crescente preocupação em diversificar a matriz energética para assegurar o acesso equitativo à energia em diferentes setores de um país (IPCC, 2021).

Os gráficos 3 e 4 representam como essas fontes se distribuem em âmbito internacional e nacional.

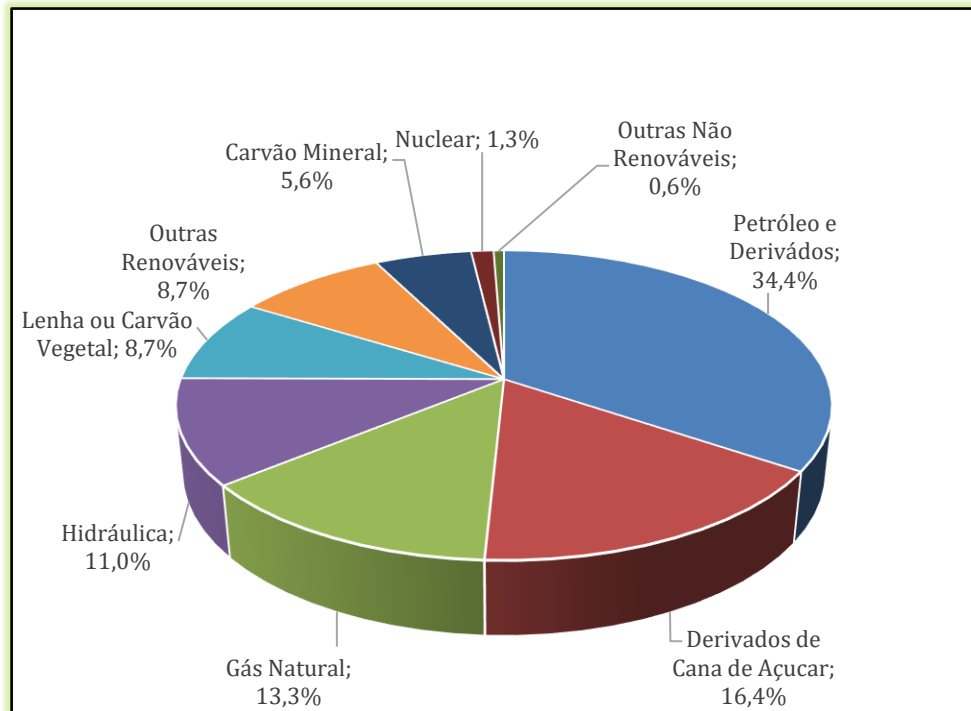
Gráfico 3 – Matrizes energéticas internacionais no ano de 2020



Fonte: IEA (2022).

No contexto brasileiro de 2021, as porcentagens variam de acordo com o seguinte gráfico:

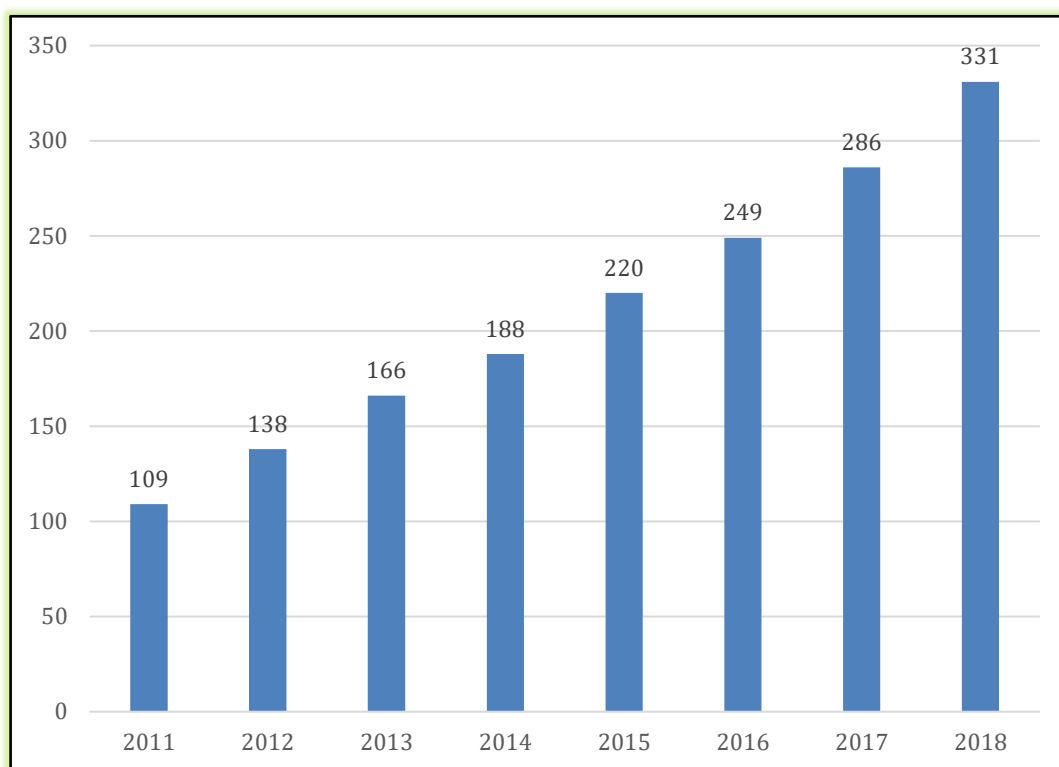
Gráfico 4 – Matrizes energéticas nacionais no ano de 2021.



Fonte: EPE (2022).

Uma alternativa que surge além das fontes de energia dos gráficos são tecnologias térmicas utilizadas na geração de energia a partir de resíduos sólidos, que empregam métodos térmicos para recuperar a energia armazenada nos resíduos, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), a diminuição do volume de resíduos e, como resultado, a redução da necessidade de espaço para a disposição final (Themelis *et al.*, 2013; Rentizelas *et al.*, 2014).

De acordo com o ISWA (2023), as plantas de aproveitamento energético de RSU na China só vem crescendo ao longo dos anos, como demonstrado no gráfico 5:

Gráfico 5 – Quantidade de plantas de recuperação de energia por RSU na china entre 2011 e 2018

Fonte: elaborado pelo autor, adaptado do ISWA (2023).

Segundo o estudo da ISWA (2023), a capacidade WTE instalada na China já ultrapassou a da Europa e deverá duplicar nos próximos 10 anos. Esta nova rede de infraestrutura já permitiu que 50% dos RSU gerados na China serão devidamente tratados pelas 400 instalações WTE.

De acordo com dados da Confederation of European Waste to Energy Plants (CEWEP, 2013), às usinas WTE da Europa geraram em 2012 uma quantidade significativa de eletricidade, atingindo cerca de 32.000 GWh. Esse valor equivale aproximadamente a 7% do consumo de energia registrado no Brasil no ano de 2014.

As tecnologias de recuperação de energia de RSU mais utilizadas são: gases de aterro sanitário, digestão anaeróbica e a incineração em massa. Os gases de aterro sanitário podem ser uma alternativa para países em desenvolvimento que ainda estão em transição de aterros e lixões não licenciados para aterros sanitários, devido ao seu baixo custo, em comparação com outras tecnologias (Galavote et al, 2022).

Segundo a tabela 1, os materiais que mais têm potencial calorífico, e consequentemente maior potencial de geração de energia são os derivados do plástico, pneus e borrachas, couros e têxteis, papelão e papéis e madeira.

Tabela 1 – PCI de diferentes materiais em MJ/Kg.

Material	PCI (MJ/Kg)
Outros Plásticos	40,93
PEAD (plástico)	40,74
Pneus e Outras Borrachas	31,55
PVC	18,99
Couros e Têxteis	16,22
Madeira	14,83
Papel e Papelão	14,74
Material Orgânico de Jardim	11,8
Desperdício de Comida	1,91

Fonte: Adaptado de Gu *et al.* (2021).

Dessa forma, é de suma importância para considerar a eficiência do aproveitamento energético por unidade de peso de RSU, a composição gravimétrica dos resíduos. Para aumentar o potencial dos resíduos de gerar energia, os processos de separação destes é um beneficiamento interessante, que vai poupar algumas variáveis do processo para garantir bons resultados, isso é demonstrado no estudo feito por Gu *et al.* (2021), cujo fez o estudo de 6 cenários:

- Cenário 1: Todos os RSU coletados são incinerados sem reciclagem e separação na fonte. Para esse tipo de cenário, valor calorífico mais baixo global é estimado em 5,718 MJ/kg (Li, 2014).
- Cenário 2: Todos os RSU são incinerados após separação dos recicláveis, no estudo se considerou que restou 42,1% de todo RSU do cenário 1.
- Cenário 3: O RSU é incinerado após a separação de todos os não combustíveis.
- Cenário 4: Os RSU são incinerados após a separação de todos os não combustíveis e 30% dos resíduos orgânicos

- Cenário 5: Os RSU são incinerados após a separação de todos os não combustíveis e 60% dos resíduos alimentares.
- Cenário 6: Os RSU são incinerados após a separação de todos os não combustíveis e 90% dos resíduos alimentares.

E com isso, o trabalho demonstrou como a eficiência de produção energética pode mais que dobrar pelo fato de executar uma separação dos materiais, como exposto na tabela 2 e no gráfico 6:

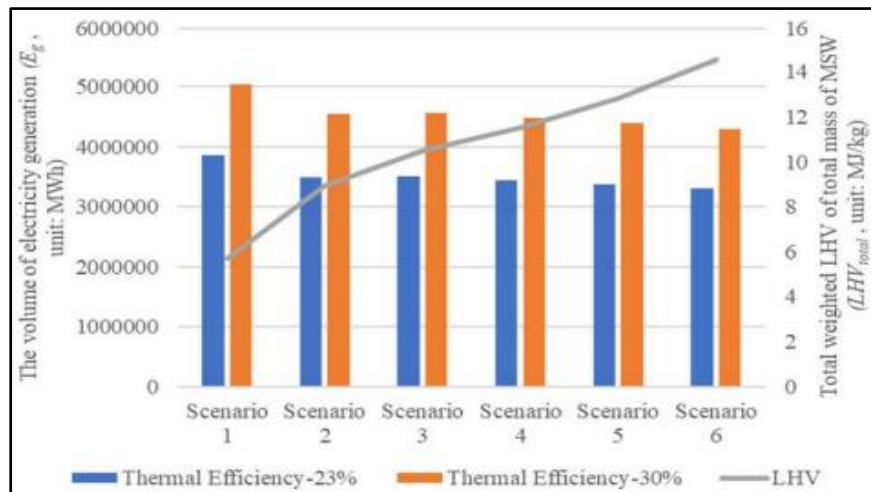
Tabela 2 – Variações de PCI em diferentes cenários e produção de energia com 23% e 30 % de eficiência.

Parâmetro	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
PCI (MJ/Kg)	5,718	8,91	10,496	11,518	12,817	14,521
Produção de Energia em MWH/t com Motor de 23% de Eficiência	0,336	0,524	0,617	0,677	0,754	0,854
Produção de Energia em MWH/t com Motor de 30% de Eficiência	0,439	0,684	0,805	0,884	0,983	1,114

Fonte: adaptado de Gu *et al.* (2021).

O gráfico 6, exemplifica de forma visual o impacto que a composição do RSU e a eficiência do motor afetam a variação de PCI.

Gráfico 6 – Variação de PCI em 6 diferentes cenários de composição de RSU.



Fonte: Gu *et al.* (2021).

Assim, mostra que quanto menos matéria orgânica e resíduos não combustíveis forem para incineração, maior será o poder calorífico inferior (PCI), portanto, maior é a eficiência de geração de energia. Demonstrando a importância de aumentar a eficiência do processo de separação dos resíduos para agregar cada vez mais efetividade nos processos de waste-to-energy.

4 METODOLOGIA

4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

A busca bibliográfica foi realizada pela plataforma online Portal Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que disponibiliza o acesso em mais de 38.000 periódicos a artigos, teses, dissertações entre outros pertencentes a diversas áreas do conhecimento por meio de bancos de dados tais como Scopus, Scielo, por exemplo. Com isso, para a elaboração do presente estudo foi utilizada a base de pesquisa Scopus. Além disso, foi também realizada uma pesquisa documental complementar utilizando o Google Acadêmico.

A pesquisa foi delimitada nos últimos 10 anos em função de conter dados mais atualizados referentes ao tema abordado, entretanto alguns documentos relevantes anteriores ao intervalo de tempo indicado também foram utilizados.

Ademais, foram considerados apenas estudos nas línguas portuguesa e inglesa, assim como foram aplicadas as abordagens de pesquisa propostas segundo Webster e Watson (2011).

Dessa forma, a revisão bibliográfica foi feita de acordo com o quadro 2:

Quadro 2 – Diretrizes da pesquisa para o trabalho e revisão bibliográfica.

Ferramenta	Base de Dados	Termos de Busca	Lapso Temporal
Pesquisa Bibliográfica	Scopus, Scielo, Web Science, Portal Periódicos Capes e Google Acadêmico	Resíduos Sólidos Urbanos, Emissão de Gases de Efeito Estufa, Waste-to-Energy, Processos Térmicos, Incineração, Pirólise, Gaseificação, Aproveitamento de Energia, Emissões de GEE por Carvão Mineral e Diesel, Geração de Energia Carvão Mineral e Diesel, Emissões de GEE por Energia Hidráulica	2013-2023
Pesquisa Documental	Planos Nacionais de Gestão de Resíduos Sólidos (PNGRS), Planos Estaduais de Resíduos Sólidos, Decretos e Resoluções e institutos de pesquisa.	Recuperação Energética de Resíduos, Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos	Não se aplica

Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.1 Seleção de processos a serem avaliados

Seguindo a revisão bibliográfica do presente trabalho, foram selecionados os processos térmicos mais comuns, sendo eles: a) Incineração; b) Gaseificação; c) Pirolise

4.1.2 Geração de Gases de Efeito Estufa

Para coletar as informações de geração de gases de efeito estufa a partir dos processos térmicos, foi feita uma busca bibliográfica nas principais plataformas de pesquisa, conforme o tópico 4.1.

Dessa forma, os estudos no qual foram utilizados para o desenvolvimento do trabalho a partir dos dados de geração de gases de efeito estufa foram:

- Palermo *et al.* (2020) – Análise de 5 cenários com a incineração de RSU;
- Mersoni *et al.* (2017) – Análise de cenário com a incineração de RSU;
- Aracil *et al.*, (2018) – Análise do cenário com gaseificação de RSU;
- Wang *et al.*, (2015) - Análise do cenário com pirólise de RSU.

No caso da incineração, cujo era o processo térmico que havia dados em mais abundância, foi levado em consideração a variação de cenários de emissão, sendo assim, buscando referências que tinham rendimentos de maiores de emissão e menores também para ter maior possibilidade de análises para uma gestão mais eficiente do tratamento dos resíduos.

A unidade de medida utilizada mundialmente para medição de emissão de gases de efeito estufa é o CO_{2eq}. Em contrapartida, algumas referências não apresentavam essa unidade de medida, por exemplo, a referência Palermo *et al.*, 2020 apresentava os dados de emissão em 3 tipos de gases, são eles: CO₂, CH₄ e N₂O, cujo são os principais quando se trata de emissões a partir de RSU.

Dessa forma, foi necessário fazer a conversão destes para a unidade de CO_{2eq}, por meio do GWP (*Global Warming Potencial*) de cada gás. De acordo com a literatura o GWP de cada um desses gases é:

Tabela 3 – Potencial de aquecimento global dos gases de efeito estufa em CO₂ Equivalente.

Gás de Efeito Estufa	CO ₂ Equivalente
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	28
Óxido Nitroso (N ₂ O)	265

Fonte: Relatório AR5 IPCC (2014).

Com essa informação, foi feito o seguinte cálculo para transformar em CO_{2eq}:

Equação 1 – Cálculo de Quantidade de CO_{2eq} através do GWP dos gases.

$$CO_{2eq} = (Emissão\ de\ CO_2 \times 1) + (Emissão\ de\ CH_4 \times 28) + (Emissão\ de\ N_2O \times 265)$$

E dessa forma, todos dados das referências foram adaptados para a unidade de medida de Dióxido de Carbono Equivalente, representando o parâmetro para gases de efeito estufa.

Além dessa conversão, também foi necessário converter as unidades de peso dos gases, cujo eram apresentadas em diferentes unidades de medida, como: Kg (quilogramas), mT (milhões de toneladas) e g (gramas).

Uma vez que foi adotado a unidade de medida de toneladas métricas (t ou TM), a conversão dessas unidades de medidas foi feita.

Com essas transformações, todos os dados do presente trabalho se apresentaram em emissão em toneladas de dióxido de carbono equivalente (t CO₂eq).

4.1.3 Cálculo da Quantidade de Resíduos (t/dia)

Um parâmetro para se levar em consideração para as análises e comparações feitas foi a quantidade de resíduo gerado por dia de cada referência.

Dessa forma, a geração de gás de efeito estufa será proporcional, quantitativamente, a cada caso das referências selecionadas, a quantidade de resíduos gerados por dia, pois uma vez que se gera mais resíduo, se encontra um potencial maior de geração de CO₂eq.

Nesse caso, alguns dados traziam a análise da geração de RSU em um cenário anual, dessa forma, foi necessário fazer uma média diária para padronizar a unidade de medida para toneladas de RSU por dia (t/dia), cujo foi feito da seguinte forma, conforme a simples equação 2:

Equação 2 – Cálculo da geração média de RSU por dia

$$\text{Geração de RSU} \left(\frac{t}{\text{dia}} \right) = \text{Geração Anual de} \frac{\text{RSU}}{365}$$

4.1.4 Cálculo do Rendimento de GEEs por Toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos

Outro parâmetro para ser analisado entre as referências foi o rendimento de GEEs por unidade de peso de RSU em toneladas.

A partir dos dados de geração de gases de efeito estufas já convertidas em dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) e as unidades de medida de peso convertidas em toneladas (t), foi feito o seguinte cálculo:

Equação 3 – Cálculo da Geração de GEE por tonelada de RSU

$$\text{Rendimentode de GEE por RSU} = \frac{tCO_{2eq}}{T \text{ de RSU}}$$

Com esse cálculo, foram obtidos os valores de rendimento de GEEs em t CO₂Eq/t para serem comparados com os diferentes processos e fontes de energia.

4.1.5 Geração de tCO₂Eq/dia

Por fim, mais um parâmetro de emissão de GEEs utilizado para comparação e análise dos dados coletados foi a geração de CO₂eq em toneladas por dia.

Esse parâmetro foi calculado a partir dos outros dois citados no tópico 4.1.3 e 4.1.4.

A equação utilizada para chegar na geração de toneladas de CO₂eq por dia, foi:

Equação 4 – Cálculo da emissão média de GEE por dia.

$$\text{Geração de GEE por dia} \left(\frac{\text{tCO}_2\text{Eq}}{\text{dia}} \right) = \frac{\text{Taxa de Geração de GEE do RSU} \left(\frac{\text{tCO}_2\text{Eq}}{\text{t de RSU}} \right)}{\text{Geração de RSU por dia} \left(\frac{\text{t de RSU}}{\text{dia}} \right)}$$

4.1.5 Elaboração da Tabela para RSU em Processos Térmicos

A fim de uma melhor organização de todas essas informações, foi elaborada uma tabela cujo cada coluna contém as informações necessárias para cada tipo de situação e referência selecionada.

Essa tabela foi gerada como planilha digital no Microsoft Excel também com o intuito de gerar análises gráficas com maior facilidade e eficiência.

A tabela 4 representa como os parâmetros encontrados e processados foram organizados:

Tabela 4 – emissão de CO_{2eq} por tonelada de RSU em cada processo térmico

Referência Bib.	Processo	Resíduo/Fonte de Energia	(t de RSU/dia)	(tCO ₂ Eq/t de RSU)	CO ₂ Eq/dia
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração	RSU	585,342	0,547	320,043
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração	RSU	1173,644	0,563	660,453
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração	RSU	2988,712	0,539	1612,286
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração	RSU	1035,178	0,570	589,867
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração	RSU	1929,726	0,490	945,110
Mersoni <i>et al.</i> (2017)	Incineração	RSU	6,384	1,324	8,451
Aracil <i>et al.</i> (2018)	Gaseificação	RSU	Estudo Macro	0,280	Estudo Macro
Wang <i>et al.</i> (2015)	Pirólise	RSU	Estudo Macro	0,119	Estudo Macro

Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.6 Levantamento da Taxa de Geração de Energia por Unidade de Peso de RSU

Além dos parâmetros de emissão de GEE, outro objetivo do trabalho também foi fazer análise das emissões em detrimento do aproveitamento energético dos resíduos

através dos processos chamados de waste-to-energy, como explicado no tópico de revisão bibliográfica, é a utilização da energia térmica gerada a partir dos tratamentos (incineração, gaseificação e pirólise) para transformá-la em eletricidade.

Com diferentes composições gravimétricas do RSU, existem variações na geração de energia, pela variação do potencial calorífico inferior (PCI).

Com isso foi considerado PCI's máximos e mínimos para os diferentes processos, buscados na bibliografia, a fim de efetuar melhores análises comparativas.

Outra consideração feita foi a eficiência do motor que gerará a energia elétrica, isso impactará diretamente na produção de energia através desses processos.

Para os processos de gaseificação e pirólise, foi considerado modelos que utilizam da formação combustível derivado de resíduo (CDR), que dessa forma, de acordo com Alfè *et al.* (2022) variam de 18-24 MJ/kg de RSU.

Com isso foi possível comparar a geração de energia para os diferentes processos a partir de uma tonelada de RSU.

Para questão da eficiência dos motores de geração de energia elétrica, foram adotadas as eficiências de 23% e 30%.

Os valores utilizados são resumidos e apresentados nas tabelas 5 e 6 de acordo com cada eficiência, cujo foram retirados das referências bibliográficas utilizadas no trabalho:

Tabela 5 – Produção de energia por unidade de peso de RSU para uma eficiência de 23%

Processo Térmico	Mín (KWh/t)	Máx (KWh/t)	Referência
Incineração	336,0	854,0	Gu <i>et al.</i> (2021)
Gaseificação	1150	1533,18	Alfè <i>et al.</i> (2022)
Pirólise	1150	1533,18	Alfè <i>et al.</i> (2022)

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Produção de energia por unidade de peso de RSU para uma eficiência de 30%

Processo Térmico	Mín (KWh/t)	Máx (KWh/t)	Referência
Incineração	439,0	1114,0	Gu <i>et al.</i> (2021)
Gaseificação	1500	1999,8	Alfè <i>et al.</i> (2022)
Pirólise	1500	1999,8	Alfè <i>et al.</i> (2022)

Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.7 Taxa de Geração de CO_{2eq} por unidade de KWH (tCO_{2eq}/KWH)

Por fim, o último parâmetro a ser avaliado no presente trabalho é o quanto de gases de efeito estufa cada resíduo gera por unidade de MWh.

Desta forma, para calcular esse parâmetro foi necessário somente efetuar a seguinte equação, considerando a produção de energia mínima e máxima de cada caso:

Equação 5 – Cálculo da geração de GEE por unidade de energia produzida.

Taxa de Geração de CO_{2eq} por unidade de KWH (tCO_{2eq}/KWh) =

$$\frac{\text{Taxa de Geração de GEEs por t de RSU} \left(\frac{tCO_2Eq}{t} \right)}{\text{Taxa de Geração de Energia por t de RSU} \left(\frac{KWh}{t} \right)}$$

Após esse cálculo, as unidades de KWh foram convertidas para MWh a fim de trazer números com menos casas decimais.

Dessa forma, gerou-se as tabelas 7 e 8:

Tabela 7 – Relação de emissão de gases de efeito estufa por unidade de energia em MWh para processos térmicos de RSU para uma eficiência de 23%

Eficiência do Motor: 23%		
Referência Bib.	t de CO ₂ eq/MWh Máx	t de CO ₂ eq/MWh Mín
Palermo <i>et al.</i> (2020)	1,6273	0,6402
Palermo <i>et al.</i> (2020)	1,6748	0,6589
Palermo <i>et al.</i> (2020)	1,6055	0,6317
Palermo <i>et al.</i> (2020)	1,6959	0,6672
Palermo <i>et al.</i> (2020)	1,4576	0,5735
Mersoni <i>et al.</i> (2017)	3,9402	1,5502
Aracil <i>et al.</i> (2018)	0,2435	0,1826
Wang <i>et al.</i> (2015)	0,1038	0,0779

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Relação de emissão de gases de efeito estufa por unidade de energia em MWh para processos térmicos de RSU para uma eficiência de 30%

Eficiência do Motor: 30%		
Referência Bib.	t de CO ₂ eq/MWh Máx	t de CO ₂ eq/MWh Mín
Palermo <i>et al.</i> (2020)	1,2455	0,4908
Palermo <i>et al.</i> (2020)	1,2819	0,5051
Palermo <i>et al.</i> (2020)	1,2288	0,4843
Palermo <i>et al.</i> (2020)	1,2980	0,5115
Palermo <i>et al.</i> (2020)	1,1156	0,4396
Mersoni <i>et al.</i> (2017)	3,0157	1,1884
Aracil <i>et al.</i> (2018)	0,1867	0,1400
Wang <i>et al.</i> (2015)	0,0796	0,0597

Fonte: elaborado pelo autor.

Uma observação importante é que os dados com valores de produção de energia mínima geraram o número maior de produção de CO₂eq/MWh e os dados de produção de energia máxima geraram o número menor de CO₂eq/MWh, pois são inversamente proporcionais.

4.2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO DE DADOS DE GERAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E DE ENERGIA POR UNIDADE DE PESO DE RSU ATRAVÉS DE FONTES DE ENERGIA CONVÊNCIONAIS.

No contexto do trabalho e considerando os aspectos da geração de energia no cenário nacional e internacional, as fontes selecionadas para comparação foram:

- Carvão Mineral
- Diesel
- Hidráulica

As fontes derivadas do petróleo e o carvão são as mais utilizadas internacionalmente de acordo com o gráfico 3 do tópico 3.4. Já a energia hidráulica é bastante expressiva aqui no cenário nacional quando comparado com o cenário internacional.

Dessa forma analisaremos fontes de energia não renováveis, como carvão mineral e diesel e fonte de energia renovável, que é a energia hidráulica.

4.2.1 Geração de GEE's/t de Combustível: IPCC

Para coletar as informações de geração de gases de efeito estufa a partir das fontes de energia, foi feita uma busca bibliográfica nas principais plataformas de pesquisa, conforme o tópico 4.1 da metodologia alterando somente as frases-chaves.

Dessa forma, os estudos no qual foram utilizados para o desenvolvimento do trabalho a partir dos dados de geração de gases de efeito estufa foram:

- Para carvão mineral e diesel: IPCC, 2006

Diferentemente dos dados de geração de gases de efeito estufa pelos resíduos sólidos urbanos, para os combustíveis (carvão mineral e diesel), os dados já vieram das referências em dióxido de carbono equivalente, o que facilitou a obtenção dessas informações.

Dessa forma, os dados obtidos estão representados na seguinte tabela:

Tabela 9 – Emissão de CO₂ eq por tonelada de combustíveis fósseis

Referência Bib.	Resíduo/Fonte de Energia	(tCO ₂ Eq/t de combustível)
IPCC (2006)	Carvão Mineral	2,400
IPCC (2006)	Diesel	2,680

Fonte: *elaborado pelo autor.*

Como a energia hidráulica não gera gases de efeito estufa de forma direta por se tratar de uma energia dita como renovável, ela será tratada isoladamente no tópico 4.2.3.

4.2.2 Geração de Energia por Tonelada de Combustível

Da mesma forma que os diferentes materiais encontrados nos resíduos sólidos urbanos possuem poder calorífico inferior (PCI) diferente, para os combustíveis não é diferente.

Com isso, foi feito uma busca dos PCI's dos combustíveis, em referências bibliográficas, também como na situação com resíduos, buscando possuir valores mínimos e máximos para geração de energia, como demonstrado nas tabelas 10 e 11:

- Carvão Mineral:

Tabela 10 – PCI de diferentes amostras de carvão mineral

UF	Mina	PCI (Kcal/Kg)
PR	Cambuí (sub-betuminoso)	4850
PR	Sapopema (sub-betuminoso)	4900
SC	Barro Branco (linhito)	2700
SC	Bonito (linhito)	4500
RS	Candiota (linhito)	3200
RS	Santa Teresinha (sub-betuminoso)	4300
RS	Morungava/Chico Lomã (sub-betuminoso)	4500
RS	Charqueadas (linhito)	2950
RS	Leão (linhito)	2950
RS	Iruí (linhito)	3200
RS	Capané (linhito)	3100

Fonte: Adaptado de SATC (2014).

Sendo assim, o valor máximo de PCI que foi utilizado foi de 4900 Kcal/Kg e o mínimo foi de 2950 Kcal/Kg.

- Óleo Diesel:

Tabela 11 – PCI de diferentes amostras de óleo diesel

Diesel	
Amostra	PCI (MJ/kg)
Amostra 1	43,834
Amostra 2	43,946
Amostra 3	45,273

Fonte: Silva *et al.* (2012)

Sendo assim, o valor máximo de PCI que foi utilizado foi de 45,273 MJ/kg e o mínimo foi de 43,273 MJ/kg.

Visto que os valores estão em unidades de medida de Kcal/kg e MJ/kg, houve a necessidade de converter esses dados para KWh/t. Dessa forma, esses cálculos foram feitos de acordo com as equações abaixo.

- Conversão de PCI em MegaJoule para KWH:

$$MJ = 0,2778KWH$$

- Conversão de PCI em Kcal para KWH:

$$Kcal = 0,00116222 KWH$$

Outro fator também a ser considerado foi a eficiência do motor em converter a energia térmica para energia elétrica. Conforme o tópico 4.1.7, as eficiências escolhidas para o presente estudo foram de 23% e 30%.

Dessa forma, o cálculo feito para energia gerada a partir dos combustíveis foi:

Equação 6 – Cálculo da energia produzida a partir de uma determinada eficiência através do PCI.

$$Energia\ produzida = Eficiência\ do\ motor \times PCI\ do\ combustível$$

Assim os resultados se encontram nas tabelas 12 e 13:

Tabela 12 – Produção de energia por unidade de peso de combustível para uma eficiência de 23%

Eficiência do Motor: 23%		
Fonte de Energia	(KWH/t) Mín	(KWH/t) Máx
Carvão Mineral	788,568	1309,824
Diesel	2699,841	2892,441

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Produção de energia por unidade de peso de combustível para uma eficiência de 30%

Eficiência do Motor: 30%		
Fonte de Energia	(KWH/t) Mín	(KWH/t) Máx
Carvão Mineral	1028,567	1708,467
Diesel	3521,532	3772,749

Fonte: elaborado pelo autor.

Por fim, conforme o tópico 4.1.8 dos parâmetros para resíduos, foi feito o mesmo cálculo para chegar nas informações de taxa de geração de gases de efeito estufa por unidade de KWh gerado, produzindo a tabela 14:

Tabela 14 – Relação de emissão de gases de efeito estufa por unidade de energia em MWh para combustíveis fósseis para uma eficiência de 23%

Eficiência do Motor: 23%		
Resíduo	t de CO₂eq/MWh Máx	t de CO₂eq/MWh Mín
Carvão Mineral	2,3333	1,4048
Diesel	0,7610	0,7104

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Relação de emissão de gases de efeito estufa por unidade de energia em MWh para combustíveis fósseis para uma eficiência de 30%

Eficiência do Motor: 30%		
Resíduo	t de CO₂eq/MWh Máx	t de CO₂eq/MWh Mín
Carvão Mineral	3,0435	1,8323
Diesel	0,9927	0,9266

Fonte: elaborado pelo autor.

4.3.3 Energia de Fonte Hidráulica

Como citado anteriormente, a energia hidráulica não emite GEE de maneira direta, pois não há processos de combustão durante o funcionamento da geração da energia como os outros casos tratados anteriormente.

Com isso, o parâmetro comparativo selecionado para a análise dessa fonte de energia foi o de $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{KWH}$.

Conforme as referências bibliográficas, esse valor é de $86\text{g CO}_{2\text{eq}}/\text{KWH}$ (Lourenço, 2016)

4.3 AVALIAR DE MANEIRA COMPARATIVA OS PROCESSOS TÉRMICOS E AS FONTES DE ENERGIA

Para confrontar os dados entre as diversas situações foi feito uma tabela unindo todos levantamentos e cálculos feitos, gerando uma melhor interpretação visual utilizando a ferramenta de planilha gráfica Microsoft Excel.

A partir da síntese desses dados, foram feitas 3 análises de comparação, sendo elas: comparação de emissão de GEE por cada caso estudado, geração de energia e a relação de emissão de GEE por unidade de energia gerada.

4.3.1 Geração de GEE

A análise comparativa tem o fim de avaliar quais das alternativas contribui mais para as emissões de gases de efeito estufa, agravando problemas ambientais de aquecimento global.

Ao ter os dados organizados em uma tabela, observou-se quais alternativas tem maior potencial poluidor por unidade de peso em toneladas.

Para uma análise visual mais eficiente foi feito um gráfico de barras das diferentes alternativas, sendo possível identificar a fonte que mais contribui para as emissões de gases de efeito estufa e a que menos contribui.

4.3.2 Geração de Energia

A análise comparativa tem o fim de verificar qual é a fonte de energia mais eficiente quando se trata de apenas de geração de energia por unidade de peso em toneladas.

Para uma análise visual mais eficiente foi desenvolvido um gráfico de barras das diferentes alternativas, sendo possível fazer uma comparação do caso que tem maior ou menor potencial de geração de energia.

Nesse caso foram feitos gráficos com cálculos de mínimos e máximos, visto que o PCI do RSU e dos próprios combustíveis podem variar de acordo com sua qualidade, dessa forma, gerando duas possibilidades de comparação.

O objetivo dessa análise é identificar qual processo de tratamento de RSU se equipara a geração de energia de alguma fonte convencional e medir o quanto isso está distante de ter eficiências energéticas próximas.

4.3.3 Relação de Emissões por Geração de Energia

Por fim, foi gerado uma análise para comparar qual das alternativas são menos danosas para o ambiente e mais eficientes em produzir energia, visto que, o objetivo desse trabalho é reduzir a emissão de gases de efeito estufa e inserir matrizes energéticas que incluem o uso de RSU como combustível.

Dessa forma, também foi analisado a partir de gráficos de barras qual dos casos obtém-se a melhor e a pior condição nesses quesitos.

A intensão principal dessa relação é entender qual caso possui um balanço mais saudável quando se trata de objetivos de redução de emissão de GEE e reaproveitamento energético.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 TAXA DE GERAÇÃO DE GEE POR TONELADA DE RESÍDUO E COMBUSTÍVEIS

Uma questão que surgiu enquanto foi feito a busca de referências bibliográficas para os diferentes processos, foi a observação de que existem muitos mais dados do processo de incineração do que dos processos de gaseificação e pirólise.

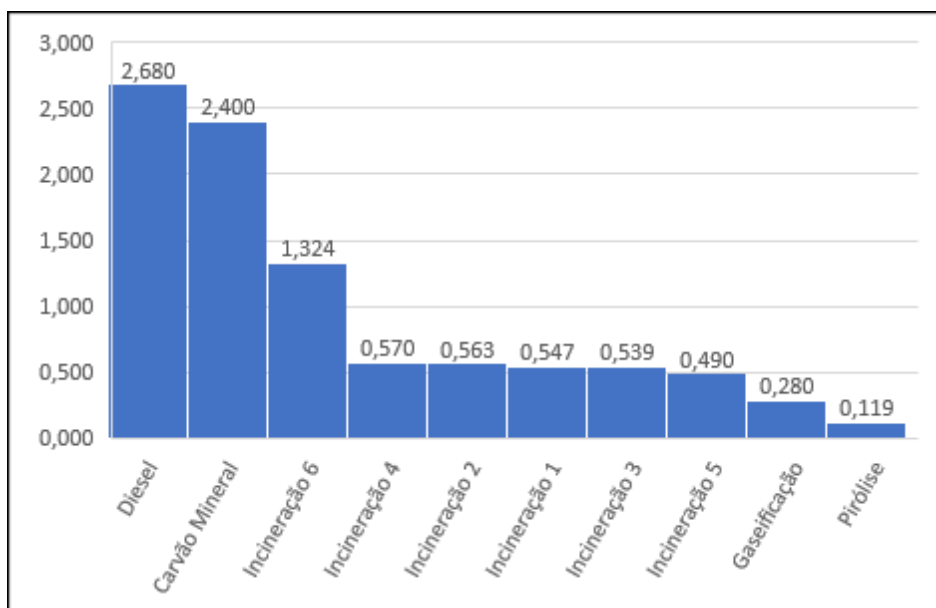
Dessa forma, foram selecionados mais dados de incineração para aproveitar a abundância de dados e para poder entender os diferentes cenários que podem ser gerados a partir do mesmo processo de incineração, no qual hoje em dia, é o processo térmico mais utilizado quando se trata de usinas WTE.

Assim, a partir da tabela 16, foi feito o gráfico 7.

Tabela 16 – Emissões de GEE por cada referência, processo e material utilizado

Referência Bib.	Processo	Resíduo/Fonte de Energia	(tCO ₂ Eq/t de RSU)
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração	RSU	0,547
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração	RSU	0,563
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração	RSU	0,539
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração	RSU	0,570
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração	RSU	0,490
Mersoni <i>et al.</i> (2017)	Incineração	RSU	1,324
Aracil <i>et al.</i> (2018)	Gaseificação	RSU	0,28
Wang <i>et al.</i> (2015)	Pirólise	RSU	0,1194
IPCC (2006)	Motor de Combustão	Carvão Mineral	2,400
IPCC (2006)	Motor de Combustão	Diesel	2,680

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 7 – Emissão de GEE em (tCO₂eq/tRSU) por processo/combustível

Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando o gráfico 7, observa-se que os combustíveis fósseis de longe são os que mais emitem GEE entre as alternativas avaliadas, sendo o diesel o maior emissor seguindo do carvão mineral como segundo maior emissor no estudo, isso acontece pelo fato de estarmos avaliando um processo de combustão e pelas características químicas da composição destes. Foi um resultado que já era esperado entre as alternativas.

Ao avaliar os processos térmicos, o caso que se demonstra com menor impacto de geração de gases de efeito estufa é a pirólise, isso provavelmente ocorre por alguns motivos, que podem ser: não utilizar ou quase não utilizar agentes oxidantes, diminuindo a formação de dioxinas e furanos e pelo próprio processo de pirólise ser mais complexo quando se trata de tratamento de gases.

O processo de gaseificação ficou como o segundo menos poluente no quesito de GEE, muito provavelmente também pela complexidade de tratamento dos gases e pelo fato de usar agentes oxidantes de maneira controlada e limitada, que quando comparado com a incineração, ocorre menos oxidação por esse fator.

Já ao observar a incineração obtém-se cenários que variam de 0,49 até 1,324 tCO₂eq/tRSU e dentro dessa variação, a incineração é o processo que mais contribui para emissão de GEE dentre os processos térmicos, por se tratar de um processo

menos complexo de tratamento de gases e não limitar agentes oxidantes, facilitando a combustão incompleta, por exemplo. Esse fato traz a necessidade de evidenciar a importância da utilização de filtros acoplados a essa alternativa.

A variação da geração de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ pode estar associada a composição dos RSU, na qual dependendo de sua gravimetria, possuirá mais ou menos substâncias para contribuir para a formação desses gases.

5.2 TAXA DE GERAÇÃO DE ENERGIA POR TONELADA DE RESÍDUO OU COMBUSTÍVEL

Dentro dos resultados atingidos da pesquisa bibliográfica e cálculos da geração de energia do recurso por unidade de peso em toneladas, da mesma forma que foi comentado no tópico 5.3.1 que existiam mais dados para incineração em comparação a pirólise e gaseificação, no quesito de aproveitamento energético não foi diferente.

Uma questão que pode ajudar na justificativa desse motivo, é que na incineração, o PCI é diretamente associado aos materiais presentes na composição dos RSU, já quando falamos sobre os processos de pirólise e gaseificação, o aproveitamento energético não se dá de forma tão direta, afinal, esses dois processos geram como produtos gases e óleos no qual se tornam a fonte de energia. Dessa forma, tornam-se os estudos mais complexos para determinar esses fatores de produção de energia.

No caso, foi utilizado a mesma referência de incineração, na qual foi citada no tópico 3.4, de Gu *et al.* (2021), na qual se tratava da variação do PCI no RSU quando não havia uma separação de material orgânico, até tendo esse mesmo material sendo 90% separado, afinal, dentro da composição do RSU, a matéria orgânica geralmente possui um PCI mais baixo, deixando a produção de energia menos eficiente.

Com isso a incineração apareceu apenas uma vez no gráfico, afinal, a mesma referência foi utilizada para todos os cenários de referência.

Os dados de rendimento energético para gaseificação e pirólise foram considerados iguais pela referência escolhida para esse trabalho, que foi o estudo de Alfè *et al.*

(2022) no qual trouxe essa variação de mínimo e máximo de rendimento energético de maneira mais simplificada.

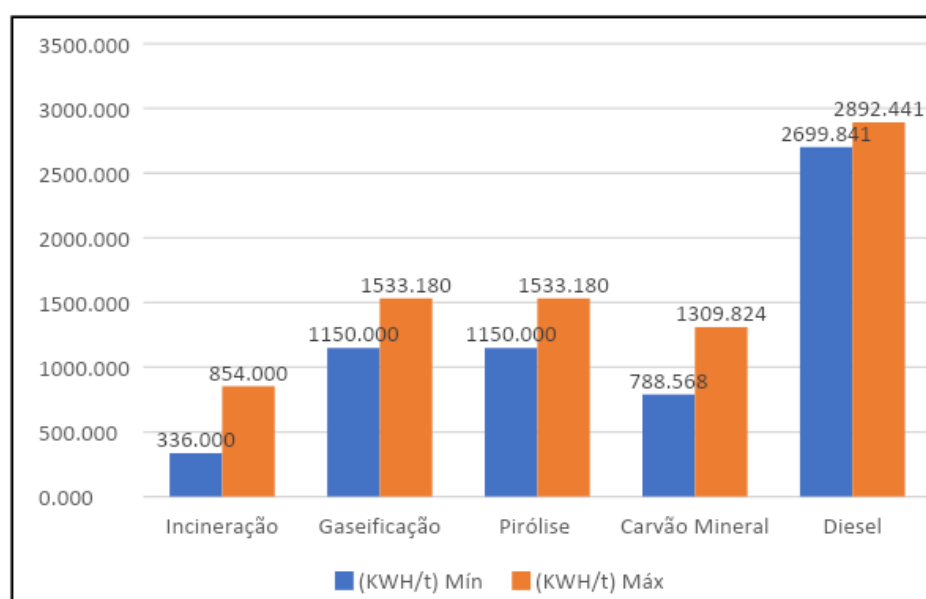
Dessa forma foi elaborado a tabela 17 incluindo o carvão mineral e o diesel e gerado o gráfico 8, para eficiência de motor de 23%:

Tabela 17 – Mínimo e máximo de produção de energia em cada processo com RSU e combustível com a eficiência do motor de combustão de 23%

Eficiência do Motor: 23%			
Referência Bib.	Resíduo	(KWH/t de RSU) Mín	(KWH/t de RSU) Máx
Palermo <i>et al.</i> (2020)	RSU	336,000	854,000
Palermo <i>et al.</i> (2020)	RSU	336,000	854,000
Palermo <i>et al.</i> (2020)	RSU	336,000	854,000
Palermo <i>et al.</i> (2020)	RSU	336,000	854,000
Palermo <i>et al.</i> (2020)	RSU	336,000	854,000
Mersoni <i>et al.</i> (2017)	RSU	336,000	854,000
Aracil <i>et al.</i> (2018)	Gaseificação	1150,000	1533,180
Wang <i>et al.</i> (2015)	Pirólise	1150,000	1533,180
Adaptado de SATC (2014)	Carvão Mineral	788,568	1309,824
Silva <i>et al.</i> (2012)	Diesel	2699,841	2892,441

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 8 – Gráfico de barras de mínimo e máximo de produção de energia em cada processo com RSU e combustível com a eficiência do motor de combustão de 23%



Fonte: elaborado pelo autor.

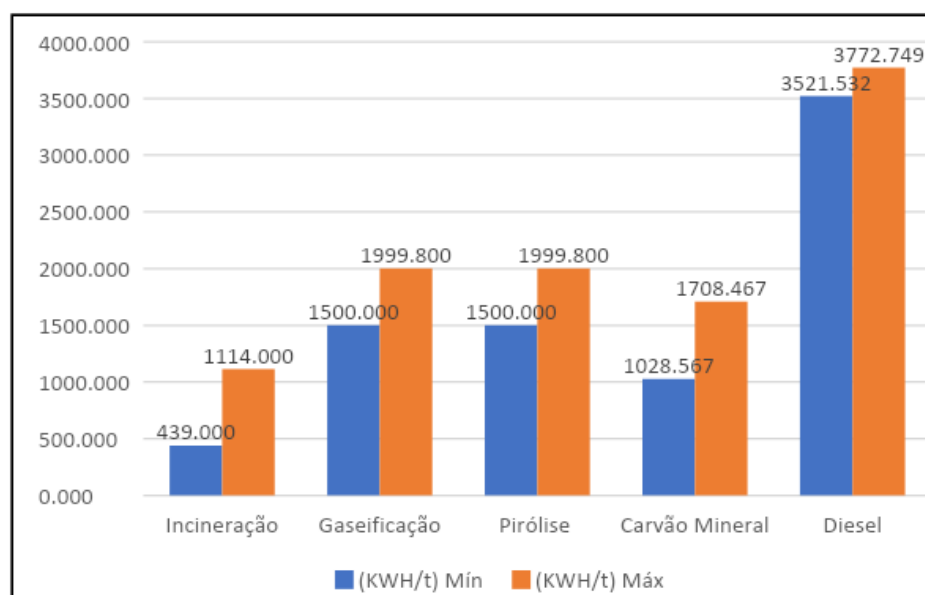
E da mesma forma, também foi elaborado a tabela 18 incluindo o carvão mineral e o diesel e gerado o gráfico 9, para eficiência de motor de 30%:

Tabela 18 – Mínimo e máximo de produção de energia em cada processo com RSU e combustível com a eficiência do motor de combustão de 30%

Eficiência do Motor: 30%			
Referência Bib.	Processo/Fonte de Energia	(KWH/t de RSU) Mín	(KWH/t de RSU) Máx
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 1	439,000	1114,000
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 2	439,000	1114,000
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 3	439,000	1114,000
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 4	439,000	1114,000
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 5	439,000	1114,000
Mersoni <i>et al.</i> (2017)	Incineração 6	439,000	1114,000
Aracil <i>et al.</i> (2018)	Gaseificação	1500,000	1999,800
Wang <i>et al.</i> (2015)	Pirólise	1500,000	1999,800
IPCC (2006)	Carvão Mineral	1028,567	1708,467
IPCC (2006)	Diesel	3521,532	3772,749

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 9 – Gráfico de barras de mínimo e máximo de produção de energia em KWh em cada processo com RSU e combustível com a eficiência do motor de combustão de 30%



Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando geração de energia por tonelada de recurso energético em cada processo, sendo eles o RSU e os combustíveis, foi concluído que tanto para eficiência de 23% e para 30% que a melhor fonte energética é o diesel, no qual quando analisado pelo mínimo, tem a capacidade de produzir mais que o dobro em comparação a pirólise e a gaseificação que são os segundos processos com maior eficiência para produção de energia para unidade de peso.

O carvão mineral fica em terceiro lugar em eficiência energética por unidade de peso e a incineração se demonstrou como a menos eficiente no estudo.

Dessa forma, em aproveitamento energético, a pirólise e a gaseificação surpreenderam os resultados de produzirem mais energia do que o próprio carvão mineral, que é uma fonte de energia bem convencional e bastante utilizada.

5.3 GERAÇÃO DE GEE POR UNIDADE DE KWH GERADO

Nesse último resultado do trabalho, a intensão era cruzar as informações de geração de GEE e de energia a fim de verificar qual de fato seriam as melhores alternativas que poderiam ajudar a reduzir a emissão de gases de efeito estufa, tratando os efeitos da grande produção de RSU e promovendo uma geração de energia compatível com alguma das fontes energéticas convencionais como carvão mineral, diesel e energia hidráulica.

De certa forma, a avaliação gira em torno de determinar qual das alternativas oferecem mais benefícios e menos danos e impactos ambientais diante do cenário de emissões de GEE.

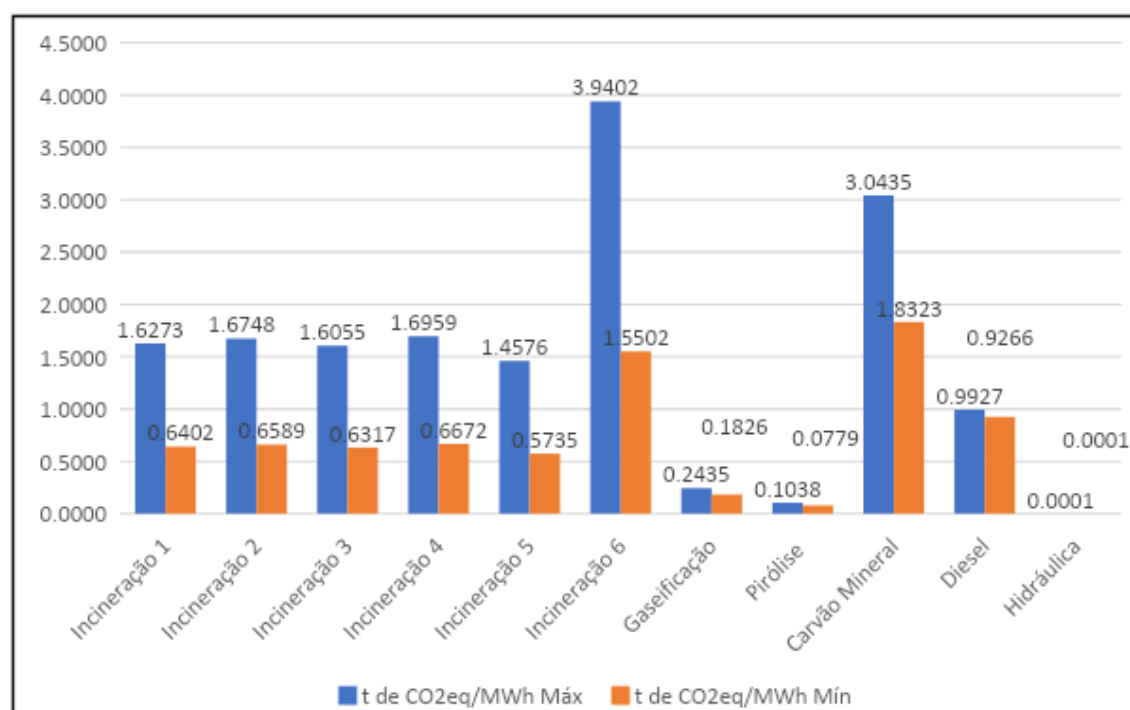
Com isso, foi elaborada a tabela 19 para organização das informações e a partir da tabela, gerado o gráfico 10 para o estudo de eficiência do motor de 23%:

Tabela 19 – Produção máxima e mínima de tonelada de CO_{2eq} por unidade de MWh produzido nos diferentes processos térmicos e fontes energéticas convencionais utilizando um motor de eficiência de 23%

Eficiência do Motor: 23%			
Referência Bib.	Processo	t de CO _{2eq} /MWh Máx	t de CO _{2eq} /MWh Mín
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 1	1,6273	0,6402
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 2	1,6748	0,6589
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 3	1,6055	0,6317
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 4	1,6959	0,6672
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 5	1,4576	0,5735
Mersoni <i>et al.</i> (2017)	Incineração 6	3,9402	1,5502
Aracil <i>et al.</i> (2018)	Gaseificação	0,8428	0,5767
Wang <i>et al.</i> (2015)	Pirólise	0,3284	0,2755
Adaptado de SATC (2014)	Carvão Mineral	3,0435	1,8323
Silva <i>et al.</i> (2012)	Diesel	0,9927	0,9266
Lourenço (2016)	Hidráulica	0,000086	0,000086

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 10 – Gráfico de barras ilustrando a dimensão da produção máxima e mínima de tonelada de CO_{2eq} por unidade de MWh produzido nos diferentes processos térmicos e fontes energéticas convencionais utilizando um motor de eficiência de 23%



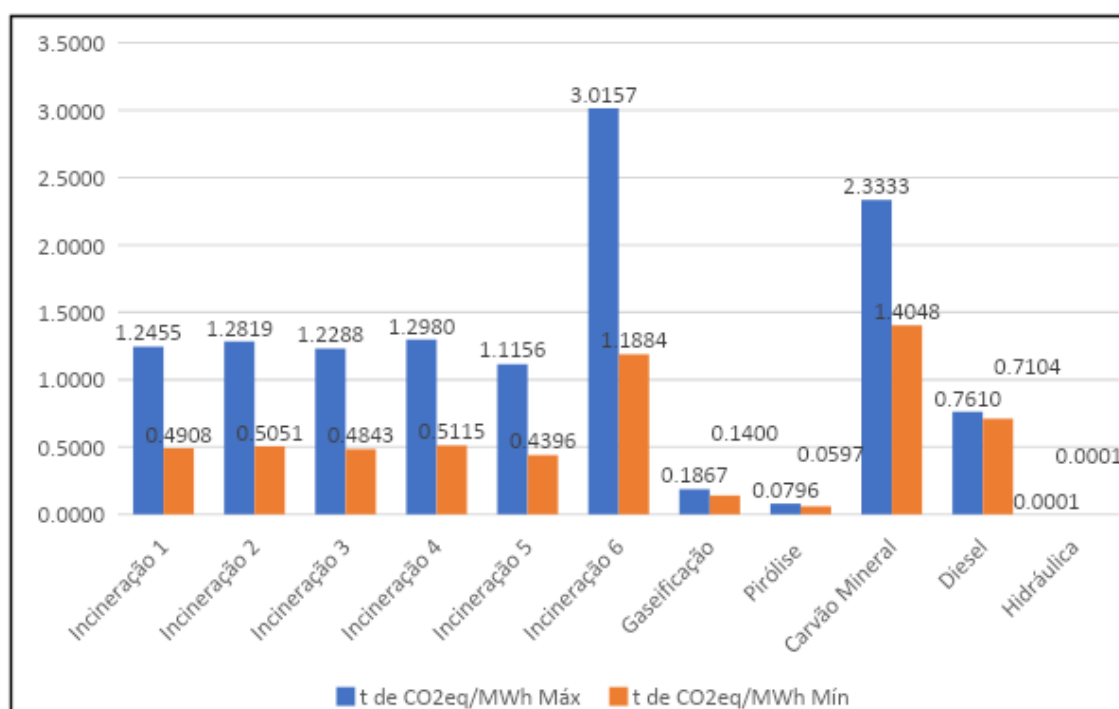
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 20 – Produção máxima e mínima de tonelada de CO₂eq por unidade de MWh produzido nos diferentes processos térmicos e fontes energéticas convencionais utilizando um motor de eficiência de 30%

Eficiência do Motor: 30%			
Referência Bib.	Processo	t de CO ₂ eq/MWh Máx	t de CO ₂ eq/MWh Mín
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 1	1,2455	0,4908
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 2	1,2819	0,5051
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 3	1,2288	0,4843
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 4	1,2980	0,5115
Palermo <i>et al.</i> (2020)	Incineração 5	1,1156	0,4396
Mersoni <i>et al.</i> (2017)	Incineração 6	3,0157	1,1884
Aracil <i>et al.</i> (2018)	Gaseificação	0,6462	0,4422
Wang <i>et al.</i> (2015)	Pirólise	0,2518	0,2112
IPCC (2006)	Carvão Mineral	2,3333	1,4048
IPCC (2006)	Diesel	0,7610	0,7104
IPCC (2014)	Biodiesel	0,7926	0,6651
Lourenço (2016)	Hidráulica	0,000086	0,000086

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 11 – Gráfico de barras ilustrando a dimensão da produção máxima e mínima de tonelada de CO₂eq por unidade de MWh produzido nos diferentes processos térmicos e fontes energéticas convencionais utilizando um motor de eficiência de 30%



Fonte: elaborado pelo autor.

Ao aumentar a eficiência do motor de 23% para 30%, são produzidos menos gases, afinal o rendimento energético é maior e essa relação de $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{MWh}$ é inversamente proporcional a relação.

Dessa forma os resultados, em síntese, ficaram da seguinte forma para cada processo separadamente:

- O diesel que foi o combustível que mais emite GEE e produz mais energia, dentro da relação $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{MWh}$ não foi a pior opção, olhando para o máximo estimado de produção de GEE por produção de energia, ficou menor que a incineração e o carvão mineral, porém ficou maior que a pirólise, gaseificação e a energia hidráulica
- O carvão mineral ao observar o valor mínimo da relação, foi a pior fonte de energia quando se leva em consideração o impacto da emissão de GEE, e ao analisar o máximo, ficou menor que a incineração 6, que se trata de uma situação de incineração com emissões altas e fora do convencional.
- A incineração de 1 a 5, ao observar o valor mínimo da relação, teve um resultado melhor que os dois combustíveis do estudo, que são o diesel e o carvão mineral, e dessa forma, demonstra o potencial que o processo térmico tem em gerar energia de maneira a reduzir as emissões. Quando se trata dos máximos, o diesel tem o valor menor que a incineração, o que também traz uma ideia de que a incineração não necessariamente é a melhor opção dos processos térmicos.
- Observando o cenário da Incineração 6, pode-se constatar que é possível atingir níveis piores da relação de $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{MWh}$ com esse processo térmico, porém, essa referência foi colocada no estudo para termos mais variáveis de análise e também verificar a importância da composição gravimétrica que influencia tanto nas emissões de GEE como no PCI dos resíduos.
- A gaseificação foi o processo térmico que ficou em segundo lugar de menor relação $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{MWh}$, afinal, é um processo que possui uma complexidade maior de tratamento de gases e produção energética a partir dos produtos gerados e só perde para pirólise dos processos térmicos, pelo fato de utilizar agente oxidante em maior quantidade.

- A pirólise, como mencionada na comparação com a gaseificação, foi o processo térmico mais eficiente na relação de emissão de GEE por produção de energia pelo fato de apresentar ampla complexidade no tratamento de gases e também ser um processo que não utilizar ou quase não utiliza agentes oxidantes, evitando a formação dos GEE.
- A hidráulica de longe é uma fonte de energia mais limpa quando falamos somente da operação da usina após sua instalação, afinal, não foi quantificado no estudo os impactos ambientais e as emissões de GEE na implantação das usinas hidrelétricas, que criam alagados que geram gases de decomposição como metano, que de certa forma, possuem um potencial grande de aquecimento global (GWP).

6 CONCLUSÃO

A partir de todos estudos e análises feitos no presente trabalho, as conclusões principais foram:

- Visando uma redução na emissão de GEE a partir dos RSU e a produção de energia, a melhor alternativa dos processos térmicos foi a pirólise, em segundo lugar, a gaseificação, e em terceiro a incineração. Porém, pontos que valem a pena considerar para estudos futuros são os custos para implementação e operação desses processos e a escala que podem atender, a fim de abranger questões econômicas e de demanda da sociedade.
- Observando os piores cenários ambientais do trabalho, que seria com eficiência de 23% e a emissão máxima por unidade de energia, a pirólise atinge um valor de 0,1038 tCO_{2eq}/MWh, a gaseificação 0,2435 tCO_{2eq}/MWh, a incineração no seu pior cenário 3,9402 tCO_{2eq}/MWh e em seu melhor cenário 1,4576 tCO_{2eq}/MWh, enquanto o carvão mineral fica com 3,0435 tCO_{2eq}/MWh e o diesel com 0,9927 tCO_{2eq}/MWh, já a energia hidráulica fica em torno de 0,0001 tCO_{2eq}/MWh.
- Desconsiderando a energia hidráulica que é muito inferior aos outros resultados, a gaseificação emite 2,3458 vezes mais que a pirólise, enquanto a incineração emite de 14,04 a 37,95 vezes mais que a pirólise e o carvão mineral e o óleo diesel em torno de 29,32 vezes mais e 9,56 vezes mais respectivamente.
- É possível gerar energia com RSU de maneira a gerar menos impactos ambientais do que com os combustíveis fósseis que foram utilizados no trabalho, sendo o carvão mineral uma alternativa de produção de energia menos eficiente que o diesel, e em maioria, menos eficiente que utilizando o RSU nos processos térmicos.
- A energia hidráulica é a única que se destacou em questão de produção de energia e baixas emissões das energias convencionais, porém, no presente estudo não foi considerado o impacto da implementação dessa fonte energética.

- A complexidade do tratamento de gases e limitação de agentes oxidantes dos processos térmicos de gaseificação e pirólise contribuem e muito para que se destaquem no presente trabalho.

Algumas considerações e sugestões para trabalhos futuros:

- É importante avaliar todo tipo de emissões de gases poluentes dos processos, no qual neste trabalho focamos somente em GEE, afinal, existem componentes do RSU, como plástico, que podem emitir gases tóxicos, aumentando a complexidade dos impactos ambientais e na saúde da população.
- Existem variações dos processos térmicos dentro da incineração e principalmente gaseificação e pirólise, logo, é importante considerar quais variações são mais adaptáveis para cada situação. No presente trabalho, essa avaliação entre os processos foi feita de forma generalizada.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – Brazilian Association of Public Cleaning and Special Waste Company. **Panorama of Solid Waste in Brazil 2018/2019 (Portuguese)**. São Paulo: ABRELPE, 2019.

ABRELPE – Brazilian Association of Public Cleaning and Special Waste Company. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: ABRELPE, 2022.

ALFÈ, M. *et al.* Pyrolysis and Gasification of a Real Refuse-Derived Fuel (RDF): The Potential Use of the Products under a Circular Economy Vision. **Molecules**, v. 27, p. 25, 2022.

ARACIL *et al.* Implementation of waste-to-energy options in landfill-dominated countries: Economic evaluation and GHG impact. **Waste Management**, v. 76, p. 443-456, 2018.

BRASIL. **Acordo de Paris**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2016.

CARDOSO, M. T. **Energy from Waste Regulation**: Suggestions to Brazil based on the Sweden Study Case (Portuguese). Doctorate Thesis, University of São Paulo, Environmental Energy Institute, 2019.

CASTRO, D. E. **Tecnologias de recuperação térmica e energética de resíduos sólidos**. Belo Horizonte: CEFET MG, 2015.

CEWEP – Confederation of European Waste-to-Energy Plants. CEWEP, 2013.

CNM – Confederação Nacional de Municípios. **Catálogo de Ações Aplicáveis aos Municípios Brasileiros para o Combate às Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Brasília, 2021.

CRUZ, A. F. **Modelagem de fornalha e caldeira para combustão de resíduos sólidos urbanos**. 2023. 64 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, 2023.

DEZHEN, C. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. **Waste Management**, v. 34, p. 2466-2486, 2014.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Nota técnica dea 18/14 – inventário energético dos resíduos sólidos urbanos: recursos energéticos**. Rio de Janeiro, 2021.

EUROSTAT. **Statistics Explained (2020)**. Municipal Waste Statistics. 2020.

FARIA, D. A. **Estudo preliminar sobre a gaseificação de resíduos sólidos urbanos em escala laboratorial**. 2023. 43 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal De Uberlândia, 2023.

GALAVOTE, T. *et al.* Energy recovery technologies from municipal solid waste: enhancing solid waste Brazilian policy. **Revista Brasileira de Energia**, v. 28, n. 1, p. 41, 2022.

GODOY, S. G. M. Projetos de redução de emissões de gases de efeito estufa: desempenho e custos de transação. **Revista de Administração**, São Paulo, v. 48, n. 2, jul. 2013.

GU, W. *et al.* Energy recovery potential from incineration using municipal solid waste based on multi-scenario analysis in Beijing. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 13, 2021.

HONG *et al.* Intensification of municipal solid waste disposal in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 168-176, mar. 2017.

IEA – International Energy Agency. IEA, 2022.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Energy Volume 2**. 2006.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Special Report on Climate Change and Land**. 2021.

IQBAL, A. *et al.* Integrated municipal solid waste management scheme of Hong Kong: A comprehensive analysis in terms of global warming potential and energy use. **Journal of Cleaner Production**, v. 225, n. 2019, p. 1079-1088, 2019.

ISWA. **White Book on Energy-from-waste (EfW) Technologies**. 2023. Disponível em: <https://www.iswa.org/blog/report-launch-whitebook-on-energy-from-waste-technologies/?v=19d3326f3137>. Acesso em: 20 nov. 2023.

JHA *et al.* Greenhouse gas emissions from municipal solid waste management in Indian mega-cities: A case study of Chennai landfill sites. **Chemosphere**, v. 71, n. 4, p. 750-758, 2008.

KAZA, S. *et al.* **What a waste 2.0**: A global snapshot of solid waste management to 2050. Washington: World Bank, 2018.

LI, Y.; ZHANG, S.; LIU, C. Research on Greenhouse Gas Emission Characteristics and Emission Mitigation Potential of Municipal Solid Waste Treatment in Beijing. **Sustainability**, v.14, n. 8398, p. 17, 2022.

LORA, E.E.S.; ANDRADE, R.V.; SANCHEZ, C.G.; GÓMEZ, E.O.; SALES, C.A.V.B. Gaseificação. In: CORTEZ, L.A.B; LORA, E.E.S.; GOMEZ, E.O. (Org). **Biomassa para energia**. Editora da UNICAMP, Campinas, SP, 2008.

LOU *et al.* Greenhouse gas emission inventories from waste sector in China during 1949-2013 and its mitigation potential. **Journal of Cleaner Production**, v. 157, p. 118-124, jul. 2017.

LOURENÇO T. M. F. **Emissão de gases de efeito estufa na produção de energia elétrica gerada por usinas hidroelétricas, eólicas e termoeletricas no Brasil**. 2016. 90 f. Monografia (Bacharelado em Engenheiro Ambiental e Sanitarista) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016.

LUIZ, B. V. **Análise de emissões de gases de efeito estufa dos resíduos sólidos urbanos do município de Florianópolis a partir da proposição de cenários de valorização de resíduos**. 2022. 109 f. Dissertação – Programa de Mestrado Profissional em Clima e Ambiente, Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia De Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

MARGALLO, M. *et al.* Enhancing waste management strategies in Latin America under a holistic environmental assessment perspective: A review for policy support. **Science of the Total Environment**, 689, 1255-1275.

MERSONI, C.; REICHERT, G. A. Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 22, n. 5, p. 13, 2017.

MOULT, J. A. *et al.* Greenhouse gas emissions of food waste disposal options for UK retailers. **Food Policy**, v. 77, p. 50-58, 2018.

PALERMO, G.C *et al.* Comparação entre tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e balanço de emissões de gases de efeito estufa no município do Rio de Janeiro, RJ, Brasil. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 25, n. 4, p. 14, 2020.

PÉREZ, L. E. *et al.* Closing the gap in the municipal solid waste management between metropolitan and regional cities from developing countries: A life cycle assessment approach. **Waste Manage**, v. 124 p. 314-324, 2021.

SAJID *et al.* Gasification of municipal solid waste: Progress, challenges, and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 168, p. 23, 2022.

SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Campinas: Átomo, 2010.

SELHORST, G. R. **Potencial energético dos resíduos sólidos urbanos no município de Nova Andradina (MS) e viabilidade econômica de instalação de uma planta de incineração**. 2023. 47 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2023.

SILVA, L. J. V. B. *et al.* Incineration of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential. **Renewable Energy**, v. 149, 1386-1394, 2020.

SILVA, M. J. *et al.* Valor calorífico para composições com biodiesel da gordura de frango e óleo diesel. **Cultivando o Saber**, v. 5, n. 1, p. 110-116, 2012.

SILVA, R. B. L. M.; TAVARES, A. A. **Estudo Do Potencial Energético Da Utilização De Biomassa E Carvão Mineral Em Termelétricas**. 2023. 47 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário UniSATC, 2023.

SINGH, C. K. *et al.* Quantitative analysis of the methane gas emissions from municipal solid waste in India. **Sci.** v. 8, 2018.

SOUZA, N. R. D.; ALENCAR, L. S.; MAZZONETTO, A. W. Potencial energético do resíduo das podas de árvores no município de Piracicaba – SP. **Revista Energia na Agricultura**, v. 31, n. 3, p. 237-245, jul./set. 2016.

WANG, H. *et al.* Life cycle assessment of fast pyrolysis of municipal solid waste in North Carolina of USA. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 511-519, 2015.

YAMAN, C. *et al.* Potential for greenhouse gas reduction and energy recovery from MSW through different waste management technologies. **J. Clean. Prod.**, v. 264, 2020.

ZHANG *et al.* Municipal solid waste management in China: Status, problems and challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 91, v. 8, p. 1623-1633, ago. 2010.

ZHAO, X. *et al.* Economic analysis of waste-to-energy industry in China. **Waste Manag**, v. 48, p. 604-618, 2016.