



UFPB

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

EDUARDO HENRIQUE ABATH ESCOREL BORGES

ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CARBONO EM UMA FÁBRICA DE
MÓVEIS: UMA ANÁLISE DAS PRINCIPAIS FONTES DE EMISSÃO

João Pessoa

2024

EDUARDO HENRIQUE ABATH ESCOREL BORGES

ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CARBONO EM UMA FÁBRICA DE
MÓVEIS: UMA ANÁLISE DAS PRINCIPAIS FONTES DE EMISSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Coordenação do Curso de
Engenharia Ambiental, da Universidade
Federal da Paraíba, como requisito à
obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Elisângela Maria Rodrigues Rocha

João Pessoa
2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B732ee Borges, Eduardo Henrique Abath Escorel.

Estratégia de redução das emissões de carbono em uma fábrica de móveis: Uma análise das principais fontes de emissão / Eduardo Henrique Abath Escorel Borges. - João Pessoa, 2024.
68 f. : il.

Orientação: Elisângela Maria Rodrigues Rocha.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. IPCC. 2. medidas de redução. 3. mudanças climáticas. 4. pegada de carbono. 5. setor moveleiro.
I. Rocha, Elisângela Maria Rodrigues. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 504(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

EDUARDO HENRIQUE ABATH ESCOREL BORGES

ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CARBONO EM UMA FÁBRICA DE MÓVEIS: UMA ANÁLISE DAS PRINCIPAIS FONTES DE EMISSÃO

Trabalho de conclusão de Curso apresentado em 25/10/2024 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Elisângela M^e R. Rocha
Profa. Dra. Elisângela Maria Rodrigues Rocha
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO
(Aprovado/Reprovado)

Claudia Coutinho Nobrega
Profa. Dra. Claudia Coutinho Nobrega
Universidade Federal da Paraíba

APROVADO
(Aprovado/Reprovado)

Aline Remigio
Profa. Dra. Aline Flávia Nunes Remigio Antunes
Universidade Federal da Paraíba

APROVADO
(Aprovado/Reprovado)

Aline Remigio
Profa. Dra. Aline Flávia Nunes Remigio Antunes
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

AGRADECIMENTOS

Ao **Poder Superior**, em primeiro lugar, por ter me dado a força e o sustento espiritual para ultrapassar os obstáculos ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, **Christianne Abath Borges e Ronald Escorel Borges Filho**, por nunca me desampararem e por serem exemplos vivos de trabalho e dedicação à causa do bem, a quem eu devo toda a honra, de todos os princípios e ensinamentos que tive o privilégio de receber.

Aos meus irmãos, **Pedro Henrique, Maria Luiza e Ana Virgínia**, por sempre terem me apoiado e contribuído com meu desenvolvimento. Em destaque, a Maria Luiza por ter me dado todo o suporte em diversos momentos, sendo a pessoa que sempre recorro quando há dúvidas na área acadêmica.

À minha namorada, **Emerly Nascimento**, parceira de todos os momentos, que me acompanha desde o segundo ano da universidade, sempre sendo uma companheira, amiga, conselheira. A sua presença constante e paciência foram fundamentais, me dando o apoio emocional em momentos difíceis, gratidão por tudo.

À minha professora e orientadora, **Elisângela Maria Rodrigues Rocha**, que para mim é um grande exemplo de dedicação ao ofício, me dando sempre o suporte necessário quando eu precisei.

À **Universidade Federal da Paraíba** e a todos meus **professores**, pelo ambiente de aprendizagem e conhecimento repassado. Que esta casa da educação possa se estruturar cada vez mais, impactar mais vidas e formar profissionais mais qualificados.

À empresa júnior **ECO's**, que foi o projeto mais relevante em minha formação, com o qual eu pude desenvolver diversas habilidades interpessoais e aprender na prática sobre o mercado de trabalho. Ao **Movimento Empresa Júnior**, por ter sido um divisor de águas em minha vida, e ter me feito conhecer muita gente boa e cultivado muitas amizades.

Por fim, a todos os meus **amigos**, tanto os da turma, que iniciaram comigo essa jornada, quanto os que tive a grata surpresa de conhecer ao longo desse processo. Graças a vocês meu dia a dia se tornou mais leve. Espero encontra-los nas andanças da vida e no mercado de trabalho.

RESUMO

As mudanças climáticas vêm sendo evidenciadas por impactos profundos que ocorrem no mundo, como o aquecimento global, o aumento do nível dos mares e da vulnerabilidade humana. Como resposta a isso, as Nações Unidas estabeleceram o Acordo de Paris, que representa um compromisso global com a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Esse trabalho teve por objetivo propor uma estratégia de redução das emissões de carbono de uma fábrica de móveis, componente chave do setor industrial no Brasil, localizada em Santa Rita/PB. Para isso foi necessário mapear as fontes de emissão de GEE da fábrica, calcular as quantidades emitidas e analisa-las identificando as principais fontes com base também em critérios como o tipo de gás emitido e se é de origem fóssil ou biogênica. Foi utilizada a metodologia disponibilizada no *Guidelines for National Greenhouses Gás Inventories* do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), utilizando dados das atividades da fábrica com base no ano de 2023. Identificou-se que as principais fontes de emissão é a queima de derivados de MDF, o consumo de combustíveis fósseis como Diesel e GLP, e o consumo de energia elétrica. A estratégia proposta de redução das emissões foi dividida em alternativas de curto e médio/longo prazo. As de curto prazo são a ampliação do sistema de energia fotovoltaica existente na fábrica e a compostagem dos derivados de MDF e outros resíduos orgânicos, e em conjunto são capazes de reduzir 64% das emissões de carbono da fábrica. Já as de médio/longo prazo envolvem a instalação de um biodigestor, que além de reduzir as emissões dos resíduos, gera o biogás, capaz de substituir o GLP como gás de cozinha, bem como a atualização da frota, quando a tecnologia de caminhões elétricos estiver acessível ao mercado. Associando as alternativas de médio/longo prazo às de curto prazo, é possível reduzir as emissões da fábrica em 77%, o que configura uma relevante contribuição para a mitigação das mudanças climáticas.

PALAVRAS-CHAVE: IPCC; medidas de redução; mudanças climáticas; pegada de carbono; setor moveleiro;

ABSTRACT

Climate change is being highlighted by the profound impacts that are occurring around the world, such as global warming, rising sea levels and human vulnerability. In response to this, the United Nations established the Paris Agreement, which represents a global commitment to reducing greenhouse gas (GHG) emissions. The aim of this study was to propose strategies for reducing carbon emissions from a furniture factory located in Santa Rita/PB. To do this, it was necessary to map the factory's sources of GHG emissions, calculate the quantities emitted and analyze them, identifying the main sources based on criteria such as the type of gas emitted and whether it is of fossil or biogenic origin. The methodology provided in the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Guidelines for National Greenhouses Gas Inventories was used, using data obtained from the factory's activities based on the year 2023. It was identified that the main sources of emissions are the burning of MDF derivatives, the consumption of fossil fuels such as diesel and LPG, and the consumption of electricity. The proposed emission reduction strategies were divided into short and medium/long term. The short-term strategies include expanding the factory's existing photovoltaic energy system and composting MDF by-products and other organic waste, and together they are capable of reducing 64% of the factory's carbon emissions. The medium and long-term projects involve the installation of a biodigester, which as well as reducing waste emissions, generates biogas, which can replace LPG as cooking gas. In addition, it is proposed to update the fleet when electric truck technology becomes available on the market. By combining medium/long-term and short-term strategies, it is possible to reduce the plant's emissions by 77%, which is a significant contribution to mitigating climate change.

KEYWORDS: IPCC; reduction measures; climate change; carbon footprint; furniture sector;

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características dos principais gases de efeito estufa.....	16
Quadro 2: Fontes de emissão de carbono consideradas no estudo de acordo com cada setor, área ou atividade envolvida.....	35
Quadro 3: Gases de efeito estufa considerados por fonte de emissão da indústria de móveis em Santa Rita/PB.....	36
Quadro 4: Redução nas emissões por fonte através das alternativas de curto e médio/longo prazo para a fábrica.....	53
Quadro 5: Análise comparativa das emissões das alternativas de curto e médio/longo prazo.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Níveis de concentração de Gases de efeito estufa, desde 1984 a 2022.....	18
Figura 2: Representação da emissão de carbono fóssil em comparação ao carbono biogênico.....	21
Figura 3: Etapas Metodológicas.....	32
Figura 4: Layout da fábrica de móveis de médio porte da zona rural de Santa Rita/PB.....	33
Figura 5: Etapas do processo de fabricação de móveis.....	34
Figura 6: CODD acumulado e CH ₄ gerado pela disposição de restos de alimentos.....	47
Figura 7: CODD acumulado e CH ₄ gerado pela disposição de papéis.....	48
Figura 8: CODD acumulado e CH ₄ gerado pela disposição de têxteis.....	49
Figura 9: Percentual de CO ₂ equivalente emitido por cada fonte.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Carbono Orgânico Degradável dos resíduos sólidos orgânicos enviados ao aterro sanitário pela fábrica.....	38
Tabela 2: Valores de MCF e Eficiência para os tratamentos de esgoto.....	43
Tabela 3: Resíduos orgânicos degradáveis gerados em 2023.....	46
Tabela 4: Emissões de carbono por etapa de tratamento de esgoto gerado na indústria de móveis.....	50
Tabela 5: Comparação entre as fontes de emissão de carbono da fábrica em 2023.....	51
Tabela 6: Redução das emissões através da compostagem.....	54

SIGLAS E ABREVIATURAS

(ANP) Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

(COD) Carbono orgânico degradável

(DBO) Demanda Bioquímica de Oxigênio

(ETE) Estação de Tratamento de Esgoto

(FEPAM) Fundação Estadual de Proteção Ambiental

(GCF) Fundo verde para o Clima

(GEE) Gases de efeito estufa

(GLP) Gás de cozinha

(IBAMA) Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais

(IPCC) Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

(MCF) Fator de correção de metano

(ODS) Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

(PGRS) Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos

(PNMC) Política Nacional sobre Mudança do Clima

(PPA) Plano Plurianual

(SIN) Sistema Interligado Nacional

(TOW) Carga orgânica total

(UNFCCC) Acordo de Paris na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3	REFERÊNCIAL TEÓRICO	15
3.1	GASES DE EFEITO ESTUFA	15
3.2	AQUECIMENTO GLOBAL E MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	17
3.3	CARBONO BIOGÊNICO X CARBONO FÓSSIL	20
3.4	MARCOS REGULATÓRIOS E ACORDOS INTERNACIONAIS	21
3.5	PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	22
3.5.1	ENERGIA	23
3.5.2	RESÍDUOS	24
3.5.3	ESGOTO.....	25
3.6	INDÚSTRIA DE MÓVEIS.....	26
3.7	ALTERNATIVAS DE REDUÇÃO DE EMISSÕES	27
3.7.1	ENERGIA FOTOVOLTAICA	27
3.7.2	COMPOSTAGEM.....	28
3.7.3	BIODIGESTOR.....	29
3.7.4	ADEQUAÇÃO DA FROTA ÀS TECNOLOGIAS EMERGENTES.....	30
4	METODOLOGIA	32
4.1	ÁREA DE ESTUDO	33
4.2	COLETA DE DADOS	34
4.3	METODOLOGIA IPCC DE CALCULO DAS EMISSÕES DE CARBONO	35
4.3.1	ENERGIA	36
4.3.2	RESÍDUOS	37
4.3.3	ESGOTO.....	41
4.3.4	CO2 equivalente.....	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	FONTES DE EMISSÃO DE CARBONO	44
5.1.1	ENERGIA ELÉTRICA.....	44
5.1.2	COMBUSTÍVEL FÓSSIL.....	45
5.1.3	RESÍDUOS	45
5.1.4	ESGOTO.....	49
5.2	PROPOSTA DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CARBONO.....	50
5.2.1	COMPARATIVO ENTRE AS EMISSÕES	50
5.2.2	ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES	52
5.2.3	REDUÇÃO GERAL DAS EMISSÕES DE CARBONO.....	57
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	58
6.1	CONCLUSÕES	58
6.2	RECOMENDAÇÕES	59
7	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Mudanças no sistema climático da Terra vêm sendo observadas e estudadas nas últimas três décadas por cientistas de diferentes lugares do mundo (Silva, 2019). Esse cenário representa um dos maiores desafios globais da atualidade e desperta o interesse internacional, por ser comprovadamente agravado pelas atividades antrópicas (Nações Unidas, 2015).

O aumento da temperatura média global é o fator motriz que causa essas alterações. Esse fenômeno vem crescendo expressivamente, desde a Revolução Industrial, em decorrência das atividades humanas, que emite massivamente gases de efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono, o metano e o óxido nitroso (OMM, 2023).

Como consequência desse processo, impactos profundos ocorrem sobre o meio ambiente. O aquecimento oceânico, por exemplo, além de estar causando desequilíbrio no ecossistema marinho, está derretendo as geleiras, o que eleva o nível dos mares, um efeito irreversível em milhares de anos (OMM, 2023). Outros impactos relevantes ocorrem, como os socioeconômicos, com o aumento da vulnerabilidade humana e insegurança alimentar (IPCC, 2023).

Para responder ao agravamento dessa problemática, foi estabelecido o Acordo de Paris, que representa um compromisso entre os países para limitar esse aumento para 1,5°C acima dos níveis pré-industriais até 2030 (Nações Unidas, 2015). Além disso, essa responsabilidade é reforçada na Agenda 2030, através do objetivo de desenvolvimento sustentável (ODS) 13, que diz respeito a tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos (Nações Unidas do Brasil, 2015).

Evidencia-se a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa como uma prioridade inadiável para os países. As nações enfrentam o desafio de alinhar o crescimento econômico com a redução das emissões (Tanaloa, 2020). Para isso, é adequado substituir fontes de energia fóssil por renováveis, aumentar a eficiência energética e implementar tecnologias mais limpas, para ser possível alcançar as metas da Agenda 2030 (Filonchyk et al., 2024).

Como forma de acompanhar o avanço das políticas feitas pelas nações, foi estabelecido, ainda no Acordo de Paris, o compromisso de se fazer inventários nacionais periódicos (Nações Unidas, 2015). Para isso, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) elaborou o *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* que é um guia metodológico para as nações contabilizarem as emissões de carbono (IPCC, 2019).

O Brasil tem grandes desafios para reduzir as emissões de carbono, como mitigar as frequentes queimadas, que vem afetando o cerrado, pantanal e amazônia (Mapbiomas, 2024).

Essa responsabilidade não é apenas do Governo, e sim de todos os agentes da sociedade, incluindo as empresas e indústrias, que devem operar em consonância adotando políticas de enfrentamento (Perlin et al., 2022).

A indústria é um componente chave nas emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Os processos industriais e o setor de energia são responsáveis por aproximadamente 22% das emissões de carbono no país (SEEG, 2022). Além disso o setor industrial, apesar de possuir atividades de difícil redução de emissões, dependendo de novas tecnologias, precisa buscar alternativas, principalmente investir em eficiência energética reciclagem e uso de combustíveis renováveis (Observatório do Clima, 2023).

As fontes de emissão de carbono variam conforme a atividade desenvolvida na indústria. O setor moveleiro, por exemplo, além de utilizar a madeira e seus derivados, que são provenientes do sequestro de carbono feito pelas árvores, geram grandes quantidades de resíduos orgânicos, que são degradados gerando gases de efeito estufa (Trindade; Heming; Deimling, 2022).

Esse trabalho utilizou a metodologia do *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* que, apesar de ser estruturada para inventários nacionais, a sua completude possibilitou a adaptação para calcular as emissões de uma fábrica de móveis no município de Santa Rita, Paraíba. Outros trabalhos, que fizeram o cálculo das emissões corporativas, também utilizaram essa metodologia, como Aguiar, Fortes, Martins (2016), Wu et al. (2023), e Zeng, Yuan, Hou (2023).

Esse estudo de caso vem contribuir para mitigar as emissões de uma fábrica de móveis de médio porte, e assim comprovar que é possível ter ações para reduzir significativamente a liberação de GEE na atmosfera. Além disso, contribui ao demonstrar que uma metodologia nacional pode ser adaptada para o uso corporativo, o que facilita a elaboração de inventários por empresas e indústrias.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Propor estratégia de redução das emissões de carbono de uma fábrica de móveis, através da análise das principais fontes de emissão.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mapear as fontes de emissão dos GEE;
- Calcular as emissões de carbono através da metodologia disponibilizada pelo IPCC (2019);
- Propor alternativas para reduzir as emissões de carbono das principais fontes da fábrica;

3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam este estudo, abordando o comportamento dos gases de efeito estufa e seu impacto nas mudanças climáticas. Também são discutidos os marcos regulatórios e os acordos internacionais relevantes, com ênfase no papel do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) na definição das fontes de emissão analisadas neste trabalho. Por fim, o capítulo explora a indústria de móveis e as alternativas para a redução de suas emissões.

Destaca-se o tópico 3.3, que aborda sobre as particularidades das emissões de carbonos biogênicos e carbonos fósseis, uma vez que seu entendimento esclarece informações importantes, discutidas nos resultados deste trabalho.

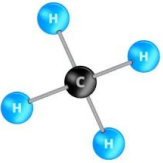
3.1 GASES DE EFEITO ESTUFA

O efeito estufa é um fenômeno natural que ocorre na atmosfera da Terra sobre a influência da radiação solar. Se não houvesse esse efeito, a temperatura média da superfície seria -18°C , logo é um processo fundamental por fazer com que a temperatura seja favorável à existência da vida (INPE, 2020). O seu excesso, entretanto, é o problema em questão, que vem sendo intensificado principalmente pelos gases de efeito estufa (GEE) liberados por atividades humanas, sendo a causa das mudanças climáticas (Santos; Pontes, 2022).

A radiação solar, principalmente a luz visível, atinge a superfície do planeta e é absorvida pelo solo, conforme o tipo de uso, e é reemitida como calor na forma de radiação infravermelha de onda longa, sendo parcialmente absorvida por gases de efeito estufa que interagem com essa energia (Ynoue et al., 2017).

Essa interação dos GEE com a radiação induz movimentos vibracionais e rotacionais nas moléculas dos gases, o que emite calor, elevando a temperatura do ar ao redor e da superfície do planeta (Filonchyk et al., 2024). Os gases que promovem esse fenômeno são o vapor d'água, o gás carbônico, o metano, o óxido nitroso, o ozônio, entre outros, mas os principais gases que vêm aumentando por ações antrópicas são o CO_2 , o CH_4 e o N_2O (Quadro 1) (Assad et al., 2019).

Quadro 1: Características dos principais gases de efeito estufa

Gás	Arranjo molecular	Principais fontes	Tempo de vida atmosférico	Potencial de aquecimento global (GWP) relativo ao CO2
CO ₂		Queima de combustíveis fósseis e desmatamento (Junior, et al., 2018)	50 a 200 anos (Filonchyk et al., 2024)	1 (IPCC, 2014)
CH ₄		Extração e transporte de gás natural, aterro sanitário e pecuária (Vieira et al., 2008)	12 anos (EPA, 2023)	28 (IPCC, 2014)
N ₂ O	 Fonte: iStock	Agricultura, processos industriais e queima de combustíveis (Almeida et al., 2015).	114 anos (Filonchyk et al., 2024)	265 (IPCC, 2014)

Fonte: Autor, 2024.

A estrutura dipolar do CO₂ facilita a interação com o infravermelho, em que ocorre a absorção e emissão de radiação térmica sobre níveis específicos de comprimento de onda (Filonchyk et al., 2024). Entretanto, apenas 45% do CO₂ que é emitido permanece na atmosfera. Da outra parte, 25% é absorvido pelo oceano, e, aproximadamente, 30% pelo ecossistema terrestre, como as florestas. Esse balanço pode variar, de acordo com características climáticas e outros fatores (Filonchyk et al., 2024).

O metano forma um arranjo estrutural tetraédrico, em contraste com a forma linear do CO₂. É um gás mais eficiente em comparação ao CO₂, e possui um tempo de vida atmosférico menor, em torno de 12 anos (EPA, 2023). A sua estrutura molecular permite a captura eficiente do calor, sendo um componente significativo para o efeito estufa (Vieira et al., 2008).

Ecossistemas aquáticos desempenham uma função relevante, tanto para o CO₂ quanto para o CH₄. Essas emissões são decorrentes da decomposição da matéria orgânica e fermentação anaeróbica, que em regiões tropicais se tornam mais intensas, devido à temperatura mais elevada acelerar os agentes decompositores. Pântanos liberam CH₄ devido a metanogênese, que ocorre em condições com pouco oxigênio (Vieira et al., 2008).

O óxido nitroso tem estrutura linear, assim como o CO₂. Apesar de sua contribuição para o efeito estufa não ser tão significativa quanto o CO₂ e o CH₄, o N₂O é um agente importante na química da atmosfera por afetar o clima através da formação de partículas aerossol,

influenciando propriedades de nuvens, reações químicas, e o equilíbrio de calor atmosférico. Além disso, o N_2O impacta os níveis de ozônio e regula as contrações de metano, que também influenciam o clima. Portanto, a ação do N_2O é complexa e depende de vários fatores, incluindo as condições atmosféricas e localização geográfica (Filonchyk et al., 2024).

Levando em consideração as características de aprisionamento de calor, medidas em termos de aquecimento global potencial, o CH_4 é 28 vezes e o N_2O é 265 vezes mais eficaz que o CO_2 (IPCC, 2014). Porém, a quantidade de CO_2 na atmosfera supera as dos outros dois gases, tornando-se uma preocupação relevante. A contínua acumulação de CO_2 o torna o gás mais problemático entre os três maiores GEE. Considerando o longo tempo de vida do CO_2 , os níveis de temperatura alcançados vão persistir por décadas, mesmo com redução de emissões para zero (Filonchyk et al., 2024).

3.2 AQUECIMENTO GLOBAL E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Mudanças climáticas vêm sendo estudadas e observadas por cientistas, como uma das pautas principais no século XXI. A crescente preocupação e interesse é potencializada por vários efeitos irreversíveis que são inéditos em milhares de anos, com modificações em curso, como a elevação do nível do mar. Essas alterações se comportam de formas distintas em diversos lugares, mas é evidenciado o aumento da temperatura média global, conhecido como aquecimento global (Lee et al., 2023).

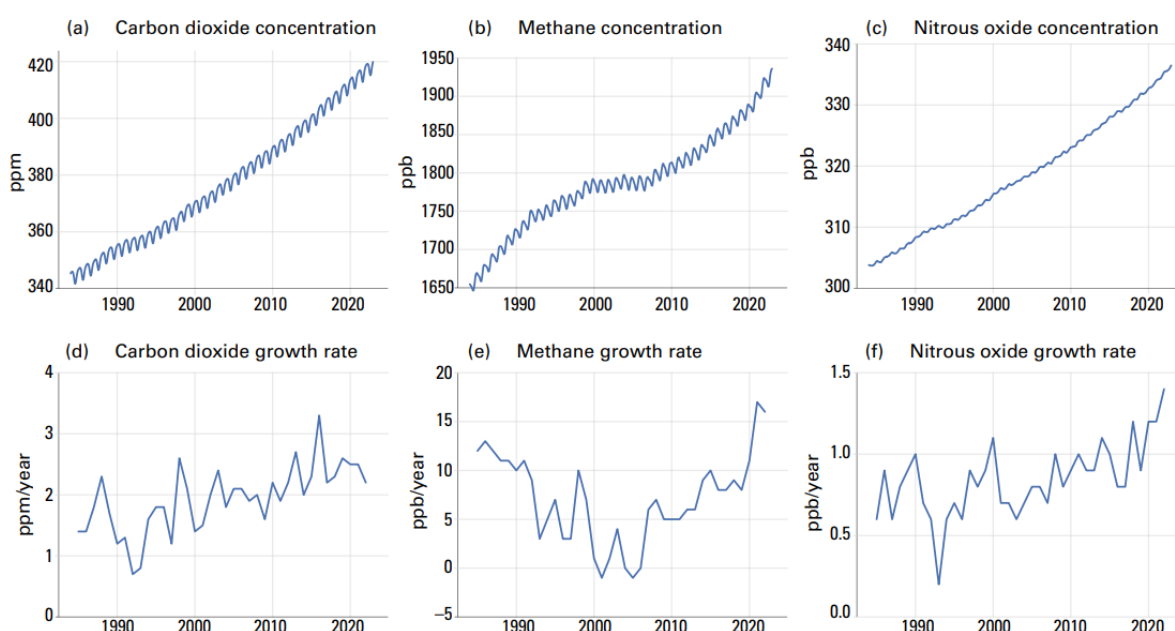
Esse aquecimento resulta do efeito estufa, fenômeno causado pela presença de gases na atmosfera que, ao interagirem com a radiação infravermelha, emitem calor (Junges et al., 2018). As concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE) refletem um balanço entre emissões de atividades humanas, recursos naturais e sumidouros. As emissões decorrentes das atividades humanas têm sido o principal agente das mudanças climáticas, desde a Revolução Industrial (OMM, 2023).

A Revolução Industrial, que iniciou na segunda metade do século XVIII, marcou um ponto de inflexão na história da humanidade, com mudanças profundas nos padrões de produção e consumo. O uso massivo de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural, proporcionou o desenvolvimento da indústria e a aceleração do crescimento econômico (Aquino et al., 2017). Porém, somente no século XX que debates sobre os impactos ambientais e climáticos obtiveram relevância, destacando o quão o sistema de produção mundial é poluidor e responsável pelo aumento das concentrações de GEE na atmosfera (Baptista, 2010).

As concentrações médias mundiais de GEE, em 2022, atingiram níveis atmosféricos com novas máximas observadas de dióxido de carbono que alcançou 417,9 partes por milhão (ppm), a de metano 1923 partes por bilhão (ppb) e a de óxido nitroso 335,8 ppb, que são, respectivamente, 150%, 264% e 124% em relação aos níveis pré-industriais, do ano de 1750(OMM, 2023).

Na Figura 1 se observa esse aumento nas concentrações atmosféricas desde o início do século XX até o ano de 2023. Visualmente essa crescente se comporta de forma quase linear, pois a taxa de crescimento oscila consideravelmente. Porém apresenta um pico a partir de 2020, principalmente para o metano e o óxido nitroso.

Figura 1: Níveis de concentração de Gases de efeito estufa, desde 1984 a 2022



Fonte: OMM, 2023.

No Brasil, só em 2022 foram emitidas 412 milhões de toneladas de gás carbônico equivalente, originados de diferentes setores de atividades. Cerca de 52% das emissões foram decorrentes da mudança de uso da terra e floresta, enquanto que 24% foi da agropecuária e 17% de processos industriais e uso de produtos, o que inclui a queima de combustíveis fósseis (Tsai et al., 2023).

O ano de 2023 foi o mais quente registrado em 174 anos de base de dados, apresentando um acréscimo de 1,45°C da média de 1850-1900, superando anos recordes como 2016 (1,29°C) e 2020 (1,27°C) (OMM, 2023). Esse aumento de longo prazo na temperatura se deu pela

elevação das concentrações de GEE na atmosfera. A mudança de La Niña, que durou de meados de 2020 até o início de 2023, para as condições de El Niño provavelmente explica parte do aumento da temperatura de 2022 para 2023 (Dahlia et al., 2024). Porém algumas localidades apresentaram aquecimento incomum, não correspondendo aos padrões típicos do El Niño, portanto é improvável que apenas um fator cause essas alterações (OMM, 2023).

Os aumentos das emissões de gás carbônico e outros gases causam um desequilíbrio radiativo na atmosfera, o que significa que energia está sendo presa pelo sistema atmosférico. Esse acúmulo de energia se dá na forma de calor, que é a causa do aquecimento global (Martinez, 2015). O oceano, que compõe cerca de 70% da superfície do planeta, absorve calor e gás carbônico, o que ajuda a minimizar o aquecimento atmosférico. Porém está ocorrendo o aquecimento e aumento da acidez, devido ao CO₂, presente nas águas oceânicas (OMM, 2023).

Todos os conjuntos de dados apontam que houve um crescimento significativo nos níveis de aquecimento oceânico ao longo das duas décadas passadas. O nível de calor oceânico em 2023 foi o maior já registrado. Prevê-se que o aquecimento continue, uma mudança que é irreversível em uma escala de centenas a milhares de anos (OMM, 2023).

Como consequência desse processo, está ocorrendo o derretimento de geleiras, o que eleva o nível dos mares. A taxa do nível do mar mais que dobrou desde que se iniciou o registro por satélite, aumentando de 2,13 mm/ano entre 1993 e 2002 para 4,77 mm/ano entre 2014 e 2023 (OMM, 2023).

As mudanças climáticas têm grandes impactos socioeconômicos. Para qualquer nível de aquecimento, o grau de magnitude e risco de impacto está atrelado à vulnerabilidade e exposição dos humanos e do ecossistema (Santos; Vitorino; Pimentel, 2017). Diversas tendências socioeconômicas de desenvolvimento contribuem para o aumento da vulnerabilidade, como o aumento de migrações, ocupações irregulares, urbanização não planejada (IPCC, 2023).

Ademais, condições climáticas e meteorológicas continuam a desencadear novos e longos deslocamentos populacionais, aumentando a vulnerabilidade (Andrade; Angelucci, 2016). Além disso, os níveis de insegurança alimentar no mundo, que mais que dobraram comparando antes do coronavírus com o ano de 2023, são agravados pelos efeitos do clima e condições extremas (Alpino et al., 2022).

Os problemas atrelados a essa alteração climática tendem a se intensificar. A meta do Acordo de Paris, que foi estabelecida na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, é limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais até 2030 e manter abaixo de 2°C (Nações Unidas, 2015). Porém, segundo a Organização Meteorológica

Mundial, existe 80% de chance de a temperatura média anual exceder 1,5° acima da média pré-industrial em um dos próximos 5 anos, superando a meta do Acordo de Paris. Existe 90% de chance de a temperatura estar no intervalo entre 1,1°C e 1,9°C (OMM, 2024).

Caso a temperatura aumente 2°C, ainda nesse século, projeta-se que haveria o aumento do nível do mar em 0,1 metros em relação à temperatura de 1,5 °C, o que exporia a riscos mais de 10 milhões de pessoas, utilizando como base a população de 2010 (Masson-delmotte et al., 2019). Apesar de uma possível estabilização no aumento da temperatura, o nível do mar continuará a aumentar, mesmo após 2100, devido à instabilidade da camada de gelo marinho na Antártida, e/ou a perda irreversível da manta de gelo na Groenlândia. E isso poderá elevar o nível em vários metros por centenas ou milhares de anos (Masson-delmotte et al., 2019).

3.3 CARBONO BIOGÊNICO X CARBONO FÓSSIL

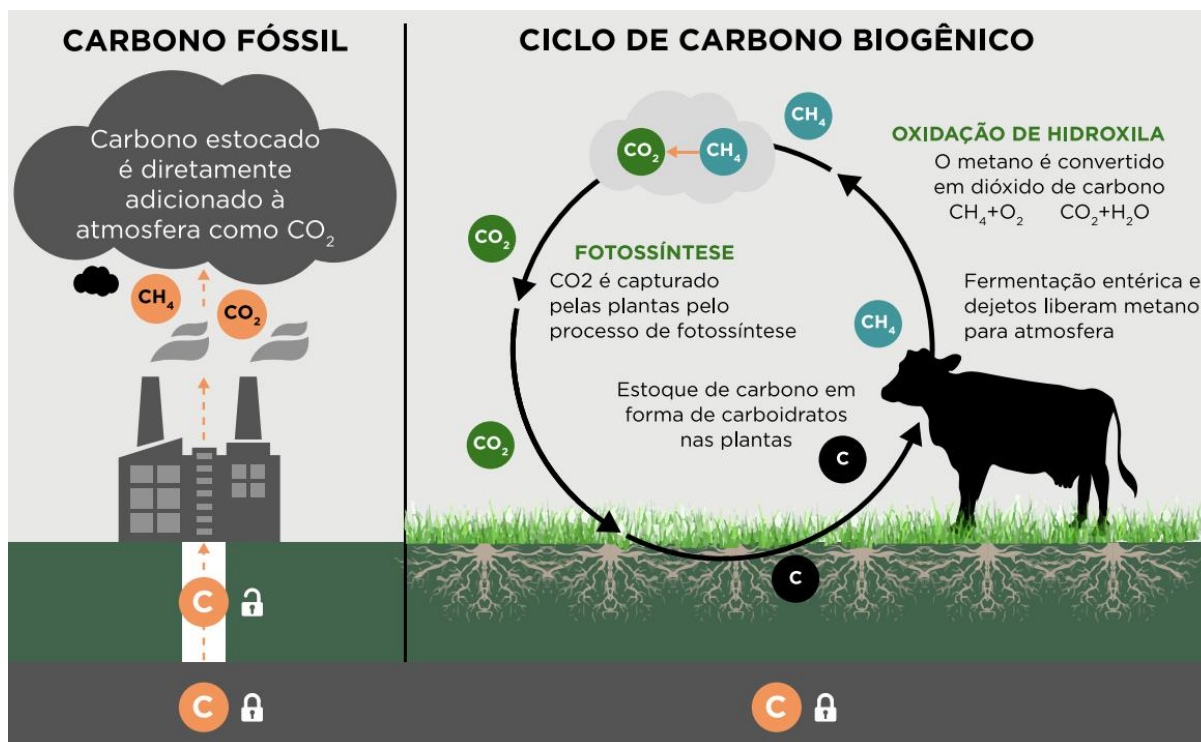
Os GEE podem tanto ser de origem biogênica quanto de origem fóssil. O carbono biogênico se refere ao carbono que tem como origem a biomassa. As emissões de fontes biogênicas respondem por mais de 70% da emissão global, que são provenientes de agricultura, pecuária, aterro sanitário, florestas e oceanos (IPCC, 2007).

O metano fóssil, como o gás natural, possui um carbono que estava estocado por milhares de anos e é extraído e queimado. A queima desse metano libera para atmosfera um gás carbônico que irá se acumular, e representa novas transferências de estoques de carbono geológico de longo prazo, impulsionando o aquecimento global (Pinto, 2022).

Cada molécula de metano na atmosfera, seja de origem fóssil ou biogênica, possui o mesmo impacto climático. Porém, o metano biogênico se trata de um carbono que recentemente estava na forma de CO₂ na atmosfera. Então, quando este é emitido, promove um aquecimento adicional, mas com o tempo a molécula é convertida novamente em CO₂, sem elevar os níveis desse gás a longo prazo, já que faz parte do ciclo biológico do carbono entre biosfera e atmosfera (Figura 2) (Pinto, 2022).

O CO₂ biogênico por sua vez, liberado principalmente em atividades de queima de biomassa, não contribui com o aumento das concentrações de carbono a longo prazo, portanto as emissões são consideradas neutras. Este CO₂ é gerado através do ciclo biológico, que possui um tempo de ciclo curto, retornando rapidamente ao estado de origem (GHG Protocol, 2014).

Figura 2: Representação da emissão de carbono fóssil em comparação ao carbono biogênico



Fonte: Pinto, 2022.

3.4 MARCOS REGULATÓRIOS E ACORDOS INTERNACIONAIS

Esforços internacionais para reduzir emissões de GEE envolveram vários acordos e iniciativas importantes. O Protocolo de Kyoto, adotado em 1997, impôs compromissos para países desenvolvidos em reduzir as emissões. Entretanto, devido ao escopo limitado e a não participação de países desenvolvidos, essa abordagem se provou ineficiente. Como resposta a isso, foi alcançado o Acordo de Paris em 2015, providenciando uma estrutura abrangente para participação de países em atingir metas nacionais de redução de GEE. Como metas, os países concordaram em tomar medidas para limitar o aquecimento global para um valor bem abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais. Considerando o impacto potencial sobre o clima e os ecossistemas, houve também um compromisso de se esforçar para limitar o aquecimento a 1,5 °C (Nações unidas, 2015).

Ademais, nesse contexto, mecanismos de financiamento internacional são um ponto crucial, como o Fundo Verde para o Clima (GCF) para países em desenvolvimento, estabelecido para financiar projetos com objetivo de reduzir as emissões de GEE. Além disso, acordos regionais e bilaterais complementam esses esforços fornecendo estratégias de redução mais direcionadas e adaptadas, assim como facilitando a troca de experiência e tecnologia entre países (Filonchik et al., 2024).

No mesmo ano que foi traçado o Acordo de Paris na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) houve a Cúpula das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável, em que foi adotada a Agenda 2030, que traz os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) . O ODS 13 é “Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos”(Nações Unidas do Brasil, 2015).

O Brasil possui 3 metas dentro do ODS 13:

- Ampliar a resiliência e a capacidade adaptativa a riscos e impactos resultantes da mudança do clima e a desastres naturais;
- Integrar a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) às políticas, estratégias e planejamentos nacionais;
- Melhorar a educação, aumentar a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre mudança do clima, seus riscos, mitigação, adaptação, impactos, e alerta precoce (IPEA, 2023).

A agenda ambiental brasileira inclui compromissos de zerar o desmatamento ilegal até 2030 e cumprir as metas do Acordo de Paris. A Agenda Transversal Ambiental, presente no Plano Plurianual (PPA) de 2024-2027, é mais abrangente e ambiciosa, com metas de redução anual de 20% da área desmatada em biomas brasileiros e projetos de infraestrutura urbana para adaptar municípios aos eventos climáticos extremos (IPEA, 2024).

3.5 PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) foi criado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, com o objetivo de fornecer às Nações todos os níveis de informações científicas para embasar o desenvolvimento de políticas climáticas. São fornecidos relatórios, avaliados e desenvolvidos por voluntários especialistas, que sumarizam tudo o que se sabe sobre mudanças climáticas, impactos e riscos futuros, e como adaptar e mitigar (IPCC, 2024).

O IPCC, enquanto corpo das Nações Unidas para avaliação da ciência relacionada a mudanças climáticas, disponibilizou diretrizes para inventários nacionais de emissões antropogênicas de GEE. As diretrizes foram preparadas em resposta à necessidade acordada entre os países vinculados à UNFCCC de cumprirem seus compromissos de relatarem o inventário de emissões antropogênicas das fontes e remoções de gases de efeito estufa. O primeiro documento com as diretrizes foi publicado em 1996, que foi revisado e atualizado em 2006, e passado por um refinamento para a última publicação de 2019 (IPCC, 2019).

As diretrizes mais atualizadas pelo IPCC são as disponíveis no arquivo intitulado “*2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*” que deve

ser consultado em paralelo com o respectivo documento referente a 2016, por nem todos os itens terem sido atualizados. Esse arquivo é composto por 5 volumes, em que o primeiro é um guia geral, e os outros 4 são referentes a setores de emissão de carbono: Energia (2º volume), Processos Industriais e uso de produtos (3º volume), AFOLU (Agricultura, Floresta e uso do solo) (4º volume) e o setor de resíduos (5º volume).

Para a fábrica de móveis estudada neste trabalho, as fontes de emissão foram agrupadas em três categorias: energia, resíduos e esgoto. Nos subitens a seguir é descrita a teoria que embasou a metodologia desenvolvida pelo IPCC para as três fontes supracitadas.

3.5.1 ENERGIA

As emissões do setor de energia são representadas principalmente pela queima de combustíveis fósseis, que ocorre em fontes móveis e fontes estacionárias. Como fontes estacionárias, têm-se parte da matriz energética brasileira que ainda queima combustível fóssil para gerar energia, principalmente quando há déficit de geração nas hidrelétricas, além de outras fontes de menor escala, setor industrial principalmente. Como fontes móveis tem-se os meios de transportes, que podem ser terrestres, marítimos ou aéreos. O setor de energia é normalmente o mais importante nos inventários, pois tipicamente contribui com 90% das emissões de CO₂ e 75% de todo gás emitido por países desenvolvidos. (IPCC, 2006)

Para inventários corporativos, normalmente não há a queima de combustível para produção de energia elétrica, porém há o consumo de energia elétrica proveniente da rede. Essa energia, por sua vez, foi produzida por usinas de outra organização fora das delimitações físicas da corporação, mas o seu uso dentro das atividades produtivas desta é o que justifica a necessidade de produção das usinas geradoras externas. Portanto, o consumo de energia elétrica é associado a emissões indiretas de carbono, que o GHG *Protocol* classifica como sendo emissões de escopo 2, logo precisam ser também contabilizados no inventário (Sotos et al., 2015).

A matriz energética brasileira é composta majoritariamente por energia renovável das hidrelétricas. Uma parcela menor da matriz é composta por fontes não renováveis em termelétricas, que queimam combustível (EPE, 2024). O Sistema Interligado Nacional (SIN) estimou um fator de emissão coerente. Essa mensuração consiste na média das emissões da geração de todas as usinas que estão gerando energia no país, não só as que funcionam na margem (acionadas pela demanda, geralmente as termelétricas) (MCTI, 2024).

Na queima de combustíveis ocorre geralmente a combustão completa. Nesse processo, todo carbono reage com o oxigênio disponível, liberando dióxido de carbono e vapor d'água

(Santos et al., 2006). Porém, devido a diversos tipos de tecnologia, pode ocorrer em menor escala a liberação de outros gases como monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), e componentes orgânicos voláteis. Portanto, é mais preciso estimar a liberação de carbono através do total de carbono no combustível, de modo que todo o carbono seja contabilizado (IPCC, 2006).

3.5.2 RESÍDUOS

O gerenciamento de resíduos no Brasil deve seguir as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída na lei nº12.305 de 2010, que define a seguinte ordem de prioridade para as ações: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Brasil, 2010).

A destinação final ambientalmente adequada são os aterros sanitários, que seguem normas operacionais específicas de modo a evitar danos, riscos e impactos à saúde e ao meio ambiente (Brasil, 2010).

A maior parte, 73%, dos resíduos sólidos gerados no Brasil são depositados em aterros sanitários. Apenas 2,37% dos materiais recicláveis são recuperados (SNIS, 2023). Logo, o Brasil tem grandes desafios para cumprir a Política Nacional de Resíduos Sólidos, considerando que só deveria ir rejeito para aterro sanitário. Rejeitos são resíduos sólidos que não são possíveis ou viáveis de serem tratados, havendo como única possibilidade a disposição final adequada (Brasil, 2010).

A composição dos resíduos do aterro varia de acordo com cada tipo de resíduo, e é um dos fatores principais que influenciam as emissões de resíduos sólidos. Diferentes tipos de resíduos contêm percentuais distintos de carbono orgânico degradável (COD) e carbono fóssil. A maioria do carbono orgânico degradável em aterro é proveniente de restos de alimento, resíduos de jardinagem, papel e papelão, madeira, materiais têxteis e fraldas. Outros tipos de resíduos, como plástico, vidro, metais e outros resíduos inertes, não possuem COD relevante para cálculo de emissões (IPCC, 2019).

A técnica utilizada para disposição dos resíduos em aterros envolve confiná-los à menor área possível e reduzi-los ao menor volume, cobrindo-os com uma camada de terra (ABNT, 1992). Esse confinamento envolve a compactação, que é realizada por maquinários apropriados, como tratores de esteira (Silva, 2021). Esse processo impermeabiliza e impede trocas gasosas, e o oxigênio que possa ter entrado durante o manejo será consumido, criando condições anaeróbias no aterro sanitário (Santos, 2011).

A maior parte da vida útil desses resíduos estará sob condições anaeróbias, favorecendo o processo de digestão anaeróbia, feita por bactérias que vivem sem oxigênio. A digestão anaeróbia produz o biogás, que é composto majoritariamente pelo gás metano, cerca de 60% (Santos, 2011). Nesse processo não há a decomposição de todo COD presente no resíduo, apenas parcela do COD é decomponível em condições anaeróbicas (IPCC, 2006).

Cerca de 40% do biogás é composto de CO_2 , porém por ser emissões biogênicas geralmente não são contabilizadas em inventários, apenas como informações itens (IPCC, 2019).

Se as condições forem constantes, a taxa de produção de CH_4 depende unicamente da quantidade de carbono remanescente no resíduo. Com isso as emissões são maiores no início da deposição e vão decaindo a medida que a matéria vai sendo decomposta. Esse processo é composto por um conjunto de reações e outras que ocorrem paralelamente (IPCC, 2019).

Um modelo completo seria muito complexo, devido a variedade de condições que existem no aterro sanitário. Entretanto, observações de campo e laboratoriais sobre os dados de geração de metano sugerem que todo o processo de decomposição pode ser aproximado a cinética de primeira ordem. Por tal motivo que o IPCC utiliza uma metodologia de decaimento de primeira ordem, para estimar as emissões de CH_4 (IPCC, 2019).

O tempo de meia vida dos resíduos é o tempo necessário para que o resíduo reduza metade de sua massa, e é um parâmetro importante. O processo de deterioração perdura por anos, dependendo da composição e condições de ambiente dos resíduos. Devido a esse espaço temporal, o método requer que os dados sejam coletados de um histórico de deposição do resíduo de um período de 3 a 5 meias vidas para alcançar um resultado com precisão aceitável. Com isso é possível fazer uma modelagem com o espaço temporal, considerando que a cada entrada, resíduos anteriores estarão em estado de deterioração diferente (IPCC, 2019).

3.5.3 ESGOTO

Esgoto sanitário consiste no despejo líquido composto de esgoto doméstico, esgoto industrial, águas de infiltração e águas parasitárias pluviais. O esgoto doméstico, por sua vez, é resultado do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas (ABNT, 1986).

A composição do esgoto doméstico é aproximadamente 99,87% de água, 0,04% de sólidos sedimentáveis, 0,02% de sólidos não sedimentáveis e 0,07% de substâncias dissolvidas. Dada a prevalência de água, considera-se que as propriedades físicas são as mesmas, por isso que o escoamento do esgoto, em tubulações e canais, é tratado como água (Nuvolari, 2021).

Devido a existência de matéria orgânica no esgoto, ocorre a proliferação de bactérias aeróbias, que degradam o carbono consumindo oxigênio em suas atividades metabólicas. Com isso, o parâmetro apropriado para medir a carga orgânica em águas residuárias é a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). A DBO consiste na concentração de oxigênio necessária para que os microrganismos oxidem toda a matéria orgânica (Kamiyama, 1988).

Estações de tratamento de esgoto podem incluir uma variedade de processos de tratamento, organizados em uma hierarquia de níveis de tratamento. O tratamento primário corresponde a processos mecânicos, como a sedimentação e retirada de areia. O tratamento secundário já inclui processos biológicos, que digerem os nutrientes do esgoto, reduzindo a DBO, como em lodos ativados, lagoas de estabilização. Também existe o tratamento terciário, para retirar ainda mais componentes indesejados, como em uma lagoa de maturação (IPCC, 2019).

Cada tipo de tratamento possui um fator de correção específico que influencia o fator de emissão de GEE. Tratamento como fossas, lagoas facultativa e anaeróbia, possuem condições de zero oxigênio em pelo menos alguma camada, dando condições a proliferação de bactérias metanogênicas, que produzem o metano biogênico (IPCC, 2019).

3.6 INDÚSTRIA DE MÓVEIS

O setor moveleiro é relevante e tradicional no cenário da indústria de transformação no Brasil. A sua produção utiliza insumos provenientes do meio ambiente, tendo como principal fonte de matéria prima madeira e seus derivados, de onde gera grandes quantidades de resíduo (Trindade; Heming; Deimling, 2022).

Segundo o Relatório Brasil Móveis (2018), o Brasil é responsável por 4% da produção mundial de móveis, em que grande parte é consumida internamente, enquanto apenas 0,4% (em termos mundiais) é destinado a exportação (Emobile, 2018). O desempenho das exportações é influenciado pela dinâmica do segmento de móveis de madeira (Galinari, 2013).

Sendo um grande produtor de resíduos, o setor moveleiro gera diversos tipos de resíduos sólidos além dos derivados da madeira e MDF. Resíduos como papéis, plástico, metais, latas de tinta, solvente, lixas, grampos e fitas metálicas, são gerados comumente, requerendo o correto gerenciamento, separação e envio para reciclagem (Trindade; Heming; Deimling, 2022).

O *Médium Density Fiberboard* (MDF) é um dos principais insumos utilizados. Consiste em um material de densidade média formado pela compactação de fibras de madeira com resinas sintéticas, utilizando a combinação de calor e pressão. Esse recurso tem em sua

composição, formaldeído, que é uma substância química que precisa ser regradada, devido ao seu potencial cancerígeno (CONSEMA, 2017).

Freire et al. (2015), através de uma revisão na literatura, identificou 16 trabalhos de avaliação de impactos ambientais de painéis de madeira e derivados. Os principais painéis avaliados foram o MDP e o MDF, devido a maior relevância econômica de ambos. Um aspecto ambiental comum a todos os 16 é o consumo de eletricidade, que para isso o autor recomenda a utilização de energias renováveis.

3.7 ALTERNATIVAS DE REDUÇÃO DE EMISSÕES

Devido as novas tendencias globais e os objetivos de desenvolvimento sustentável, incentiva-se que as organizações em geral tomem medidas para reduzir as emissões de suas atividades produtivas. Esse cenário favorece o desenvolvimento de tecnologias e da pesquisa, que vem contribuir na descoberta de formas mais sustentáveis de se produzir, dentro de cada setor específico.

Cada alternativa de redução tem efeito em pelo menos uma fonte de emissão. Dentre as possibilidades existentes pode-se destacar a transição energética, como a utilização de energia fotovoltaica, e adequação de frotas às novas tecnologias elétricas e de biocombustíveis. Além dessas, unidades de degradação de resíduos orgânicos como compostagem e biodigestores apresentam benefícios à problemática.

3.7.1 ENERGIA FOTOVOLTAICA

A procura de uma matriz energética mais sustentável é um importante meta da atualidade, e a energia fotovoltaica representa um ponto chave nessa transição (Sousa; Lira; Moraes, 2024). Energia fotovoltaica é a energia produzida a partir da interação da radiação com materiais semicondutores, como o silício purificado. Essa energia, gerada como corrente continua, é convertida em alternada por um inversor. Essa energia pode ser tanto encaminhada para a rede de distribuição (on grille) quanto para baterias (off grille), dependendo do interesse do proprietário (Ottonelli et al., 2021).

Energia fotovoltaica não emite GEE na geração, e as perdas de energia elétrica são reduzidas, por a geração ser próxima aos centros consumidores, e possibilita a redução do uso de usinas térmicas. Porém há grandes desafios associados a essa tecnologia, como os altos investimentos iniciais e a necessidade de dar o destino correto aos componentes utilizados no sistema no final do ciclo de vida transição (Sousa; Lira; Moraes, 2024).

O Brasil possui condições favoráveis para implantar sistemas fotovoltaicos. Por possuir grandes áreas próximas da linha do equador, o nível de radiação solar é elevado, aumentando a

produção por metro quadrado. Além do sol, o semiárido nordestino possui áreas planas e clima favorável (Ottonelli et al., 2021).

A utilização dessa tecnologia vem crescendo consideravelmente desde 2016 e é uma oportunidade de substituição do uso de fontes não renováveis na geração de energia (Ottonelli et al., 2021). Portanto, o uso dessa tecnologia reduz as emissões de carbono, e isso é comprovado na pesquisa de Lira et al. (2019), em que foi estimado que as emissões de CO₂ evitadas devido aos sistemas fotovoltaicos instalados no Ceará em 2017 foram quase 4.000 toneladas de CO₂.

A implantação de sistema fotovoltaico não é livre de impactos. Apesar da produção de energia em si ser considerada limpa, existem impactos diretos e indiretos relacionados à extração e manufatura dos materiais, e diretos relacionados ao transporte, processos estes que geram GEE. Além disso, para sistemas implantados no solo há a mudanças do uso da terra, que requer a supressão da vegetação nos arredores, para evitar sombreamento sobre as placas. Por fim, no final da vida útil dos equipamentos é preciso dar o correto direcionamento aos resíduos, a fim de minimizar os impactos (Pereira; Coria, 2022).

3.7.2 COMPOSTAGEM

A compostagem é uma técnica controlada de degradação e estabilização da matéria orgânica, o qual transforma resíduos orgânicos em um composto usado para correção do solo (Freitas, 2016). Ela permite a reciclagem de nutrientes, que permanecem no solo, melhorando a qualidade, após a degradação. Esse processo favorece o desenvolvimento dos seres fotossintetizantes, que capturam carbono a longo prazo (Figueiredo et al., 2019).

Esse tipo de tratamento ocorre em condições aeróbias, na ação de microrganismos que utilizam o oxigênio para decompor a matéria orgânica, gerando majoritariamente CO₂, enquanto que a produção de metano é mínima (Basso, 2014). Segundo pesquisa científica desenvolvida por Inacio (2010), na compostagem há a redução de 86% da produção de metano em comparação ao aterro sanitário.

Além de evitar a produção de metano, a compostagem executa a fixação de carbono através dos processos biológicos, durante a degradação da matéria orgânica, o que, segundo Sánchez et al. (2015), favorece a redução do agravamento do efeito estufa. Com a degradação o carbono fica composto em substâncias mais simples e mais fáceis de serem absorvidas pelas plantas (Oliveira; Fernandes, 2018).

À medida que a matéria orgânica vai sendo degradada, o CO₂ vai sendo produzido. Os microrganismos decompõem as substâncias mais instáveis de forma rápida, e em seguida as de maior estabilidade a decomposição (Cunha; Mendes; Giongo, 2015). Com isso, o processo de emissão é reduzido com o tempo, cessando no momento de término da fermentação aeróbia (Sardá, 2010).

O sucesso de redução das emissões através da compostagem depende também do correto manejo. Alguns fatores são essenciais para garantir a eficácia como o teor de matéria orgânica, a umidade, o nível de atividade microbiológica e a relação carbono/nitrogênio (Sardá, 2010). Algumas medidas podem ser tomadas para minimizar ou até zerar a pouca produção de metano, como a introdução de microrganismos metanotróficos que oxidam o metano nas leiras (Santos, 2010), como no trabalho de Lima Júnior et al. (2017), em que utilizaram os metanotróficos e obtiveram emissões desprezíveis de CH₄, próximas a zero.

Esse tipo de tratamento já vem sendo aplicado no setor industrial. Ramos et al. (2017) indica a compostagem como uma das principais alternativas para reciclar ou reutilizar resíduos de madeira de uma madeireira na Amazônia. Já Beuren (2019) utilizou diferentes tipos de resíduos agroindustriais na compostagem, incluindo a serragem de indústria moveleira, que foi um resíduo essencial para controlar a umidade do sistema.

3.7.3 BIODIGESTOR

O biodigestor é um equipamento utilizado para promover a degradação da matéria orgânica através da biodigestão anaeróbia realizada por bactérias, que produz como subproduto o biofertilizante líquido e o biogás (Hachem et al., 2023). A biodigestão anaeróbia é um processo executado por microrganismos na ausência de oxigênio, que transforma substâncias orgânicas complexas em compostos simples, como metano e CO₂ (Kunz, 2017).

O biodigestor é uma solução para a destinação e acúmulo de resíduos orgânicos em aterros sanitários, além de reduzir o lançamento de gás metano para a atmosfera (Hachem et al., 2023). Ademais, traz benefícios econômicos, como a geração de energia e de biofertilizantes, que podem trazer uma fonte de renda (Menezes et al., 2023).

Existe uma variedade de biodigestores, que diferem em dimensão e tipo de abastecimento. Em relação à dimensão, podem ser de pequeno, médio e grande porte, relacionado ao volume de reservatório de biomassa. Sobre o tipo de abastecimento tem-se o contínuo ou em batelada. O modelo de biodigestor mais difundido no Brasil é o canadense, conhecido como fluxo tubular, que possui uma construção simples, com uma câmara de digestão e um gasômetro inflável (Santos, 2023).

O biogás produzido consiste em uma mistura gasosa composta de 55% a 70% de metano e 30% a 45% de gás carbônico, além de pequenas quantidades de outros gases. A queima do biogás é considerada limpa e renovável, sendo uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis (Araújo, 2017). O poder calorífico do biogás é de 20.799kJ/m³ (Anushua et al., 2020), em que, segundo Guiducci et al. (2023), 1 m³ de biogás equivale a 0,45 kg de GLP.

O biodigestor precisa ser ativado com um material, geralmente esterco animal, rico em nutrientes e bactérias (Hachem et al., 2023). Estudos como Fernandes e Chohfi (2010), Mendes (2019) e Cotta et al. (2015), comprovam a eficácia do uso de esterco de diferentes animais, como suínos, caprinos e bovinos. Além disso, outros tipos de resíduos orgânicos como restos de alimentos podem ser utilizados, devendo ser evitado frutas cítricas (Hachem et al., 2023).

3.7.4 ADEQUAÇÃO DA FROTA ÀS TECNOLOGIAS EMERGENTES

A adequação da frota às tecnologias emergentes está inserida no escopo da transição energética, que é uma das principais pautas relacionadas ao Acordo de Paris, como forma de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (Gonçalves; Goes; D'Agosto, 2020).

O setor de transporte brasileiro ainda é dominado por veículos movidos a combustão interna *flex*, capazes de operar com etanol e gasolina, em que 27% da mistura é etanol anidro (ICCT, 2023). O setor é responsável pelo consumo de aproximadamente 35% dos combustíveis fósseis e 48% das emissões de CO₂ do país (Brasil, 2019). A parte de logística e transporte é gerador de grandes externalidades negativas, como geração de resíduos, congestionamentos, poluição sonora e atmosférica (Branco et al, 2023).

Grandes economias ao redor do mundo vêm dando a atenção a este problema, desenvolvendo programas e ações direcionados ao ganho de eficiência energética e reduções de GEE nos transportes. Na União Europeia, por exemplo, foi estabelecido políticas como: metas severas para substituição do combustível fóssil por renovável, diretrizes para potencializar o desenvolvimento tecnológico dos veículos e a renovação da frota e ampliação da infraestrutura intermodal, entre outros (Branco et al, 2023).

O Brasil possui mais de 1,9 milhão de caminhões com idade média de 17,9 anos (ANTT, 2020). Portanto, a renovação da frota, aderindo as recentes de maior nível tecnológico deve ser incentivado. Segundo Ricardo *Energy & Environment* (2017), com a taxa de renovação da frota de 15 a 20% ao ano, haveria a redução de 7% das emissões de CO₂ do setor rodoviário de cargas até 2025.

Os primeiros caminhões elétricos foram autorizados a rodar no Brasil, em fase de testes, pela Senatran do Ministério dos transportes. Um dos desafios atuais enfrentados é o peso das

baterias, que é mais de duas toneladas, havendo a demanda de regulação específica pelo Conselho Nacional de Trânsito (Contran) (Infra, 2024).

Os veículos elétricos à bateria têm emissões 65% a 67% mais baixas que os movidos a combustão interna flex, tendo como base a média da gasolina e o etanol. Essa redução foi calculada considerando carros de passeio, demandando ainda estudos específicos para caminhões, que é uma tecnologia ainda em desenvolvimento (ICCT, 2023).

Entretanto, a produção de veículos elétricos não é livre de impactos ambientais. As baterias, que são um dos principais componentes, utilizam metais que precisam ser minerados e processados, e para cada etapa dessa é utilizado energia elétrica, gerado resíduos e emitido carbono. Portanto ainda é um desafio da indústria aumentar o tempo útil desse equipamento, reciclar os componentes e dar a destinação mais adequada para os resíduos (Aoyague, 2024).

Uma outra alternativa muito importante para esta problemática é a crescente utilização de biocombustíveis na matriz de transporte, como o biodiesel. Projeta-se que a participação dos biocombustíveis na matriz do transporte alcance 30% até 2030, devido a compatibilidade com a tecnologia veicular atual e devido a infraestrutura de distribuição e abastecimento (Agência Brasil, 2021).

O biodiesel, enquanto biocombustível, está participando cada vez mais da matriz de transporte brasileira. Foi aprovado, recentemente, o aumento do percentual de biodiesel no diesel, que passou de 12% para 14%. Estima-se que até 2026 esse valor chegue a 15% (Rodrigues, 2023).

Um dos desafios ainda é o da distribuição e abastecimento de biocombustíveis. O aumento da demanda por biocombustíveis trouxe conflitos socioeconômicos devido a necessidade de terras agricultáveis, e vem afetando a segurança alimentar (OECD-FAO, 2021). Além disso, a produção causa impactos ambientais, principalmente pela mudança do uso do solo, que gera emissões diretas e indiretas de carbono (Romeiro; Paulino, 2024).

O governo está promovendo políticas que favorecem a participação dos biocombustíveis na matriz energética nacional, como a promulgação da lei nº 13.576, de 2017, que dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). O Renovabio traz um impulso ao desenvolvimento tecnológico e inovação no setor, portanto em breve esse mercado será uma grande oportunidade para a redução das emissões de carbono (Brasil, 2017).

4 METODOLOGIA

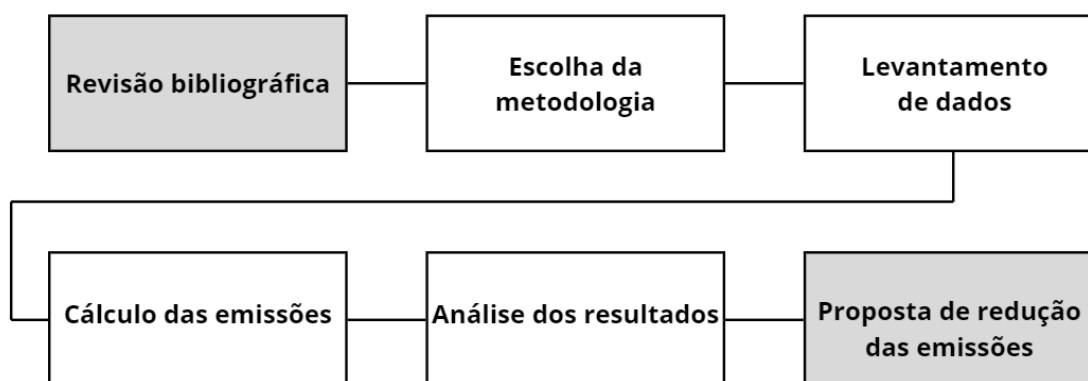
Essa pesquisa trata-se de um estudo quantitativo de caráter descritivo. O levantamento bibliográfico foi realizado no período de agosto a outubro de 2024, por meio da busca eletrônica nas ferramentas Google Acadêmico, *Scielo*, *Scopus* e *Capes*, as quais possibilitam acesso a artigos, teses, dissertações e monografias. Além disso, foram utilizados relatórios publicados por organizações oficiais, como o IPCC, a Organização Meteorológica Mundial, entre outras.

Para refinamento das referências escolhidas priorizou-se estudos publicados no período entre 2014 e 2024, que contenham informações relacionadas a emissões de carbono e que tenham sido escritos nos idiomas inglês e português.

A metodologia deste trabalho (Figura 3) foi baseada no documento técnico IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, para quantificar as emissões de carbono, que, nesse estudo, foi aplicado a uma fábrica de móveis. O estudo envolve as emissões de carbono no período de um ano, portanto todos os dados de entrada são decorrentes das atividades desenvolvidas no ano de 2023, como ano de referência. A escolha do ano civil como período de registro dessas emissões é o recomendado pelo IPCC, por facilitar a transparência de informações.

A escolha da metodologia do IPCC se deu por ser reconhecida internacionalmente, e amplamente utilizada. Apesar de ter sido criada para inventários na escala nacional, trabalhos voltados para organizações e empresas, como Aguiar, Fortes, Martins (2016), Wu et al. (2023), e Zeng, Yuan, Hou (2023), vêm utilizando os métodos, que possuem uma adaptabilidade para ser aplicado a diferentes setores. Isso permite a comparabilidade entre estudos, o que enriquece a base científica, favorecendo o desenvolvimento contínuo das diretrizes do IPCC.

Figura 3: Etapas Metodológicas

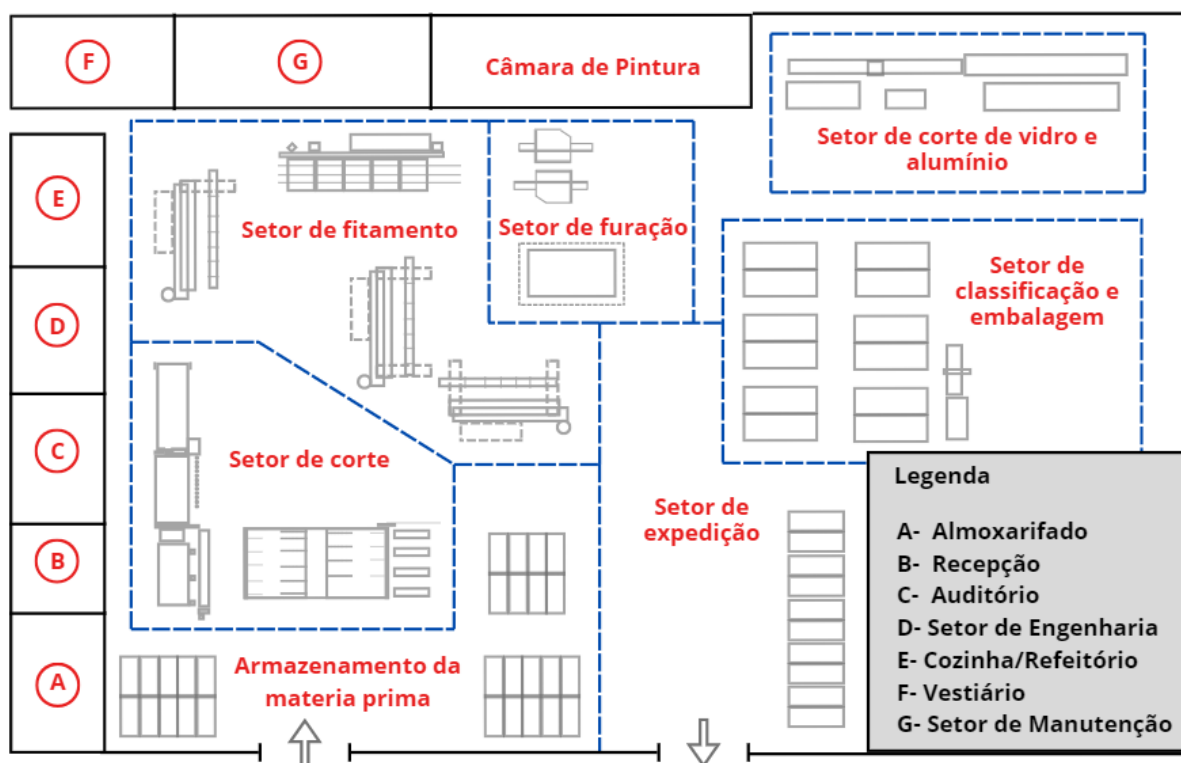


Fonte: Autor, 2024.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A fábrica de móveis é de médio porte, com o propósito de criação de móveis personalizados, utilizando principalmente o MDF como matéria prima. Está localizada em área rural do município de Santa Rita/PB e possui 8.000 metros quadrados. O seu espaço é dividido em diversos setores, cada um responsável por uma etapa do processamento dos móveis planejados (Figura 4).

Figura 4: Layout da fábrica de móveis de médio porte da zona rural de Santa Rita/PB

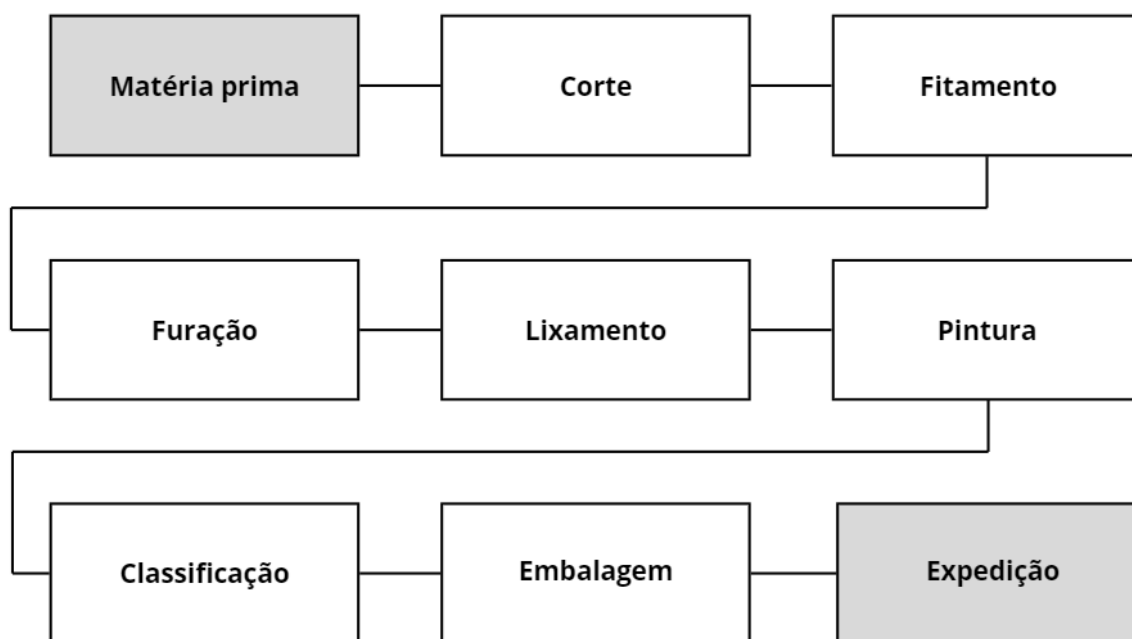


Fonte: Autor, 2024.

O detalhamento do processo de fabricação envolve 9 etapas, com layout de processos ilustrado na Figura 5. Inicia-se com a matéria prima que é transportada para a fábrica pela empresa fornecedora, armazenada, e encaminhada para o setor de corte, conforme a demanda, gerando resíduos de fragmentos de MDF e pó de serra. Em seguida, as peças de MDF seguem para o fitamento, processo este que também gera o pó de serra, pela retirada de 1 mm de madeira das bordas. Após isso as peças são encaminhadas para a furação e lixamento, gerando mais pó de serra, sendo então preparadas para o processo de pintura, que gera resíduos de tinta. Por fim, é feita a classificação e embalagem, etapa que utiliza componentes plásticos, para posteriormente serem encaminhados para expedição.

Importante considerar que o ciclo do MDF não é o único fluxo de processamento de matéria prima. Ainda há o setor de corte de vidro e alumínio onde são preparadas partes complementares do produto final, gerando resíduos desses materiais.

Figura 5: Etapas do processo de fabricação de móveis



Fonte: Autor, 2024.

4.2 COLETA DE DADOS

Para o cálculo das emissões de carbono considerou-se as emissões diretas e indiretas das atividades desenvolvidas dentro da fábrica, além disso, emissões provenientes da entrada da matéria prima e da saída do produto final (Quadro 2).

Devido o estudo estar direcionado para a proposição de uma estratégia de redução das emissões de carbono da fábrica, foi considerado apenas as fontes que estão sobre a gerencia da administração do empreendimento. Com isso foram inclusas emissões da destinação dos resíduos orgânicos, do consumo de energia elétrica, do uso de diesel como combustível e do uso de GLP como gás de cozinha.

Outras fontes provenientes de stakeholders, como empresas terceirizadas, deslocamento diário de funcionários, não foram contabilizadas, por não serem passíveis de gerenciamento pela fábrica.

Quadro 2: Fontes de emissão de carbono consideradas no estudo de acordo com cada setor, área ou atividade envolvida

Setor/Área/Atividade	Fontes de emissão de carbono
Setor de corte	Energia Elétrica, resíduos de pó de serra e de fragmentos de MDF
Setor de fitamento	Energia Elétrica, resíduos de pó de serra
Setor de furação	Energia Elétrica, resíduos de pó de serra
Setor de corte de vidro e alumínio	Energia elétrica
Setor de classificação e embalagem	Energia elétrica
Câmara de pintura	Energia elétrica
Setores: almoxarifado, recepção, auditório, engenharia, manutenção	Energia elétrica
Banheiros	Esgoto
Cozinha e refeitório	Gás de cozinha e resíduo orgânico
Fornecimento de matéria prima (transporte)	Diesel
Transporte do produto final	Diesel

Fonte: Autor, 2024.

4.3 METODOLOGIA IPCC DE CALCULO DAS EMISSÕES DE CARBONO

A metodologia utilizada é disponibilizada no documento técnico “*2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*”, que é aplicável para países, apresentando métodos de cálculo de emissão de carbono para cada tipo de fonte. As fontes identificadas neste trabalho são (Quadro 3): energia, resíduos e esgoto, gerados na fábrica em 2023.

Na prática, CO₂ também é gerado no aterro sanitário e na Estação de Tratamento de esgoto sanitário, porém por serem de origem biogênica, as emissões a longo prazo são consideradas nulas. Caso o objetivo desse trabalho fosse fazer um inventário de todas as emissões da fábrica, esses gases e outros, como o óxido nitroso, precisariam ser contabilizados.

No caso do pó de serra e dos fragmentos de MDF, apesar de emitirem CO₂ biogênico foram considerados no estudo, devido a grande quantidade que é gerada na fábrica e a emissão ser instantânea no processo de combustão.

Quadro 3: Gases de efeito estufa considerados por fonte de emissão da indústria de móveis em Santa Rita/PB.

Fontes de emissão		Destino	Gases considerados
Energia	Energia elétrica	Uso	CO ₂
	Diesel	Queima	CO ₂
	GLP	Queima	CO ₂
Resíduos	Pó de serra	Coprocessoamento	CO ₂
	Fragmentos de MDF		CO ₂
	Papel	Aterro Sanitário	CH ₄
	Têxteis		CH ₄
	Resto de alimentos		CH ₄
Esgoto		ETE	CH ₄

Fonte: Autor, 2024.

4.3.1 ENERGIA

As fontes de emissão de carbono relacionadas com energia abrangem o consumo de energia elétrica e o consumo de combustíveis.

a) CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

As emissões do consumo de energia elétrica são calculadas multiplicando o consumo pelo fator de emissão (Equação 1). O fator de emissão utilizado foi o disponibilizado pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), com valor de 0,0385 kg CO₂/kWh, ano de referência 2023. Na fábrica há a geração de energia elétrica através de uma usina fotovoltaica, sistema “on grid”, o que evita o consumo de energia elétrica disponibilizada pela rede de distribuição, portanto deve ser subtraído no cálculo.

$$Emissões_{CO_2} = [Consumo_{El} - Geração_{El}] \cdot FE_{El} \quad (1)$$

Em que:

$Emissões_{CO_2}$: emissões de CO₂ (kg);

$Consumo_{El}$: consumo de energia elétrica (kWh);

FE_{El} : fator de emissão de energia elétrica (tCO₂/MWh).

b) QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

Para as emissões decorrentes da queima de combustíveis fósseis, foi considerada apenas a liberação do dióxido de carbono, em condições de combustão completa, apesar de outros gases poderem ser gerados. As emissões provenientes da queima de combustíveis serão pelo somatório da multiplicação do total consumido pelo respectivo fator de emissão (Equação 2).

$$Emissões_{CO_2} = \sum_a (Combustível_a \cdot FE_a) \quad (2)$$

Em que:

$Emissões_{CO_2}$: emissões de CO₂ (kg);

$Combustível_a$: combustível consumido (TJ);

FE_a : fator de emissão (kg/TJ).

Os únicos combustíveis considerados no estudo foram o Diesel e o GLP (gás de cozinha). Os fatores de emissão utilizados foram respectivamente 74.100 kg CO₂/ TJ e 63.100 kg CO₂/ TJ, que são valores padrões estabelecidos pelo IPCC, devido à falta de um fator específico nacional.

Os dados de entrada são a quantidade de combustível consumido, em quilogramas, portanto foi necessário converter para medida de energia (joule) através do poder calorífico. O poder calorífico do Diesel e do GLP são, respectivamente, 42.258 kJ/kg e 46.440 kJ/kg, segundo o anuário estatístico da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Por fim, o dado disponibilizado da quantidade de Diesel está em litros, logo utilizou-se a densidade desse combustível de 0,84t/m³.

4.3.2 RESÍDUOS

Os resíduos estudados foram organizados em duas partes: resíduos sólidos urbanos e derivados de MDF.

a) RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A metodologia adotada para as emissões decorrentes da disposição de resíduos sólidos urbanos está disponível no módulo 5 das diretrizes do IPCC. Os resíduos depositados em aterro

sanitário têm como principal fator de geração o gás metano. O metano emitido pelo aterro sanitário não é o mesmo que o metano gerado, portanto será calculado pela Equação 3.

$$Emissões_{CH_4} = \left[\sum_x CH_4 \text{ gerado}_{x,T} - R_T \right] \cdot (1 - OX_T) \quad (3)$$

Em que:

$Emissões_{CH_4}$: CH₄ emitido no ano T (Gg);

T : ano do inventário;

x : categoria ou tipo de resíduo;

R_T : CH₄ recuperado no ano T, (Gg);

OX_T : fator de oxidação no ano T (fração).

Cada tipo de resíduo possui uma parte de carbono orgânico degradável (COD). Para estimar o COD que representa todo o resíduo depositado, é preciso fazer uma média ponderada, através da Equação 4.]

$$COD = \sum_i (COD_i \cdot W_i) \quad (4)$$

Em que:

COD : fração de carbono orgânico degradável no total de resíduos (Gg/Gg);

COD_i : fração de carbono orgânico degradável na categoria de resíduo i ;

W_i : fração dos resíduos da categoria i no total de resíduos;

Materiais inertes ou de degradação muito lenta, como metais, plásticos, vidro, entre outros, não foram considerados neste estudo. Com base na caracterização dos resíduos da fábrica, os degradáveis foram divididos em três classes, com seus respectivos COD (Tabela 1)

Tabela 1: Carbono Orgânico Degradável dos resíduos sólidos orgânicos enviados ao aterro sanitário pela fábrica

Resíduo	COD (%)
Papel	40
Têxteis	24
Restos de alimentos	15

Fonte: IPCC, 2006.

A parte de carbono orgânico degradável não será totalmente decomposto em condições anaeróbias. Logo, para saber a fração que será decomposta utilizou-se a equação 5.

$$CODDm = W \cdot COD \cdot COD_f \cdot MCF \quad (5)$$

Em que:

$CODDm$: massa de COD decomponível disposto (Gg);

W : massa total de resíduo disposto (Gg);

COD : fração de carbono orgânico degradável no ano de deposição (Gg/Gg);

COD_f : fração do COD decomponível em condições anaeróbias;

MCF : fator de correção para decomposição aeróbica.

O COD_f utilizado foi determinado com base nos padrões dados pelo IPCC. Porém, devido a este parâmetro variar conforme a composição do resíduo, optou-se por fazer uma média ponderada com base na porcentagem de cada resíduo. Portanto, foi utilizado o COD_f de 0,5 para resíduos de decomposição moderada (têxteis e papel) e de 0,7 para resíduos de decomposição alta (restos de alimentos).

O fator de correção de metano para decomposição aeróbica (MCF) adotado foi 1, recomendado para sistemas anaeróbios bem manejados.

As emissões serão calculadas com base no método de Decaimento de Primeira Ordem, considerando que a decomposição do resíduo não é imediata. Portanto ao destinar novos resíduos, metano de disposições anteriores continua sendo gerado. Foi realizada uma modelagem, com base na equação 6, em que foi considerado deposição de resíduos no aterro desde o ano 2018, para se calcular o $CODDm$ acumulado. Em seguida, através da Equação 7 foi calculado o quanto foi decomposto no ano T.

$$CODDma_T = CODDmd_T + (CODDma_{T-1} \cdot e^{-k}) \quad (6)$$

$$CODDm_{decomp_T} = CODDma_{T-1} \cdot (1 - e^{-k}) \quad (7)$$

Em que:

T : ano do inventário;

$CODDma_T$: $CODDm$ acumulado no aterro até o fim do ano T (Gg);

$CODDma_{T-1}$: $CODDm$ acumulado no aterro até o fim do ano (T-1) (Gg);

$CODDmd_T$: $CODDm$ depositado no aterro no ano T (Gg);

$CODDm_{decomp_T}$: $CODDm$ decomposto no aterro no ano T (Gg);

k : constante de reação, $k = \ln(2)/t_{1/2}$ (ano^{-1});

$t_{1/2}$: tempo de meia vida (anos).

Sabendo o que foi decomposto no ano de referência, é possível saber o que foi gerado de metano, através da equação 8.

$$CH_4 \text{ gerado}_T = CODDm \text{ decomp}_T \cdot F \cdot 16/12 \quad (8)$$

Em que:

$CH_4 \text{ gerado}_T$: quantidade de CH_4 gerado pela decomposição do material;

$CODDm \text{ decomp}_T$: CODDm decomposto no aterro no ano T (Gg);

F : fração de CH_4 produzido, em volume, nos gases de aterro;

16/12: razão do peso molecular CH_4/C (razão).

Para a fração de CH_4 produzido (F) o IPCC recomenda o valor de 0,5, considerando que a maior parte dos resíduos dispostos em aterro geram um gás com aproximadamente 50% de metano.

b) RESÍDUOS DERIVADOS DO MDF

Os resíduos de pó de serra e fragmentos de MDF, são, por sua vez, incinerados em coprocessamento. Esses materiais podem ser interpretados como combustíveis para esse processo, o que seria, portanto, abordado no setor de energia (módulo 2 das diretrizes IPCC). Porém, o IPCC não dispõe de fator de emissão específico para MDF.

Logo, optou-se por utilizar o método de emissões de carbono da incineração de resíduos, disponível no módulo 5, que é calculado através da fração de carbono presente no material, a porcentagem de matéria seca no resíduo e no fator de oxidação (Equação 9).

$$CO_2 \text{ Emissões} = \sum_i (RS_i \cdot dm_i \cdot FC_i \cdot FCF_i \cdot OF_i) \cdot 44/12 \quad (9)$$

Em que:

$CO_2 \text{ Emissões}$: emissões de CO_2 no ano de inventário (Gg/ano);

RS_i : quantidade total do tipo de resíduo sólido (Gg/ano);

dm_i : porcentagem de matéria seca no resíduo sólido;

FC_i : fração de carbono na matéria seca;

FCF_i : fração de carbono fóssil na matéria seca;

OF_i : fator de oxidação (fração);

44/12: conversão de carbono para CO_2 .

Devido aos derivados de madeira não possuírem nenhum percentual fóssil, a FCF_i foi desconsiderada da fórmula, sendo calculada, portanto, as emissões de origem biogênica. Além disso, levou-se em consideração que o incinerador opera em boas condições, promovendo a combustão completa do material, sendo o CO_2 o único gás emitido por esse processo. Portanto o fator de oxidação foi considerado 100%. Para a fração de carbono do MDF e a porcentagem de matéria seca utilizou-se os padrões do IPCC, que são respectivamente 0,427 e 85%.

4.3.3 ESGOTO

O método aplicado para calcular as emissões decorrentes da decomposição da matéria orgânica no sistema de esgoto foi o proposto pelo IPCC para efluentes domésticos, considerando que na fábrica não há efluente industrial.

O esgoto da fábrica é depositado em uma fossa séptica, que periodicamente é coletado por caminhões limpa fossa quando há o preenchimento desta. Então é transportado para ser depositado em uma estação de tratamento de esgoto (ETE). A ETE de Santa Rita é composta por um sistema em série, contendo uma lagoa anaeróbia, lagoa facultativa e lagoa de maturação.

Dado que cada etapa do tratamento de esgoto apresenta condições específicas, especialmente em relação ao nível de decomposição anaeróbica permitido em cada fase, foram calculadas as emissões parciais correspondentes a cada etapa do processo (Equação 10). A emissão total decorrente do efluente doméstico é calculada através do somatório de todas as emissões de cada etapa do tratamento (Equação 11).

$$EmissõesCH4_j = [(TOW_j - S_j) \cdot FE_j - R_j] \quad (10)$$

$$EmissõesCH4 = \sum_j [EmissõesCH4_j] \cdot [10^{-6}] \quad (11)$$

Em que:

$EmissõesCH4_j$: emissões de CH_4 decorrentes da etapa de tratamento j, no ano do inventário, kg CH_4 /ano;

$EmissõesCH4$: emissões de CH_4 decorrentes de todo sistema de tratamento, Gg CH_4 / ano;

TOW_j : parte orgânica do efluente na etapa de tratamento j, kg DBO/ano;

S_j : parte orgânica do efluente retirado na forma de lodo, na etapa de tratamento j, kg DBO/ano;

J: cada etapa de tratamento;

FE_j : fator de emissão por etapa de tratamento j, kg CH_4 / kg DBO;

R_j : total de CH_4 recuperado de cada etapa de tratamento j, kg CH_4 /ano.

A carga orgânica total do efluente gerado pela fábrica (TOW) é calculada com base na quantidade de pessoas que geram o efluente (população) e na DBO per capita anual (Equação 12).

$$TOW = P \cdot DBO \cdot 0,001 \cdot D \quad (12)$$

Em que:

TOW : parte orgânica do efluente na etapa de tratamento j (kg DBO/ano);

P : quantidade de frequentadores da fábrica (pessoas);

DBO : DBO_5 per capita no ano do inventário (g/pessoas.dia);

0,001: conversão de gramas de DBO para quilos de DBO;

D : dias equivalentes trabalhados no ano.

A Equação 12 precisou ser adaptada do IPCC, para direcionar o cálculo para a realidade de uma corporação. No IPCC o parâmetro “ D ” equivale a 365 dias, porém como a fábrica funciona em um regime de 44 horas semanais, foi calculado o total de horas trabalhadas no ano e dividido por 24, obtendo os dias equivalentes trabalhados.

A DBO adotada foi a disponibilizada pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM) que tem valor de 54 g/pessoas.dia.

O IPCC apenas disponibiliza dados de remoção de lodo para sistemas aeróbicos e digestores anaeróbios, não disponibiliza para lagoas de estabilização, portanto, foi adotado a remoção de orgânico por parte do lodo igual a zero, conforme recomendado pelo método.

O fator de emissão (FE_j) é uma função do máximo de potencial de produção de CH_4 (B_o) e do fator de correção de metano (MCF_j) (Equação 13). B_o é um valor padrão de 0,6 kg CH_4 /kg DBO.

$$FE_j = B_o \cdot MCF_j \quad (13)$$

Em que:

FE_j : fator de emissão (kg CH_4 /kg DBO);

B_o : máxima capacidade de produção de CH_4 (kg CH_4 /kg DBO);

MCF_j : fator de correção de metano (fração).

O IPCC disponibiliza uma tabela com os fatores de correção de carbono para cada tipo de tratamento, porém não dispõe de uma metodologia para sistemas de tratamento por lagoas em série. Portanto foi utilizado como referência Silva et. al, 2023, que faz uma revisão da

metodologia de estimativa de GEE oriundo de tratamento de esgoto e considera que em sistemas de tratamento de lagoas em série, de uma etapa para outra há a redução da DBO. Portanto, precisa-se considerar a eficiência na remoção de DBO entre as etapas, quando se utiliza a equação 12, havendo diferentes valores de TOW_j para cada tratamento. A Tabela 2 mostra os valores de MCF e da eficiência considerados no estudo.

Tabela 2: Valores de MCF e Eficiência para os tratamentos de esgoto

Processo	MCF (IPCC)	Eficiência (Ef)	Fonte (Ef)
Fossa	0,5	30%	Jordão, 2014
Lagoa anaeróbica	0,8	50-60%	Von Sperling, 1996
Lagoa facultativa	0,2	70-85%	Von Sperling, 2002a
Lagoa de maturação	0,2	--	--

Fonte: Autor, 2024.

A etapa 1 de tratamento, que é a disposição em fossa, utiliza a carga orgânica total TOW produzida pela fábrica. As cargas orgânicas das etapas seguintes foram calculadas com base na equação 14.

$$TOW_{remanescente} = TOW_{etapa\ anterior} \cdot (1 - Ef) \quad (14)$$

Em que:

$TOW_{remanescente}$: parte orgânica do efluente que entra na etapa atual (kg DBO/ano);

$TOW_{etapa\ anterior}$: parte orgânica do efluente da etapa anterior (kg DBO/ano);

Ef : eficiência da etapa de tratamento (fração).

4.3.4 CO2 equivalente

Para permitir uma comparação entre o metano gerado e o CO₂, foi convertido as emissões de metano para a medida de CO₂ equivalente, que é uma métrica recomendada pelo GHG Protocol e pelo IPCC, de modo a relacionar os impactos climáticos dos gases. A conversão consiste em multiplicar o valor de emissão de gás metano pelo seu respectivo potencial de aquecimento global (GWP). O GWP do metano, segundo o IPCC é 28, enquanto do CO₂ é 1.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo foi dividido em duas partes. A primeira (5.1), traz os resultados de cada fonte de emissão de forma individual. Já a segunda (5.2), aborda uma análise comparativa das emissões, de modo a identificar quais fontes têm maior impacto sobre as mudanças climáticas e apresenta a estratégia de redução das emissões de carbono da fábrica.

5.1 FONTES DE EMISSÃO DE CARBONO

5.1.1 ENERGIA ELÉTRICA

Na fábrica estudada existe um sistema fotovoltaico, composto por 472 placas de 350W, compondo uma potência pico de 165,2 kWp. Essa potência gera em média anualmente um total de 263.700 kWh. Mesmo com essa geração própria, houve, em 2023, um excedente de consumo de 204.742,06 kWh de energia da rede elétrica, que corresponde ao somatório de todas as faturas de energia do ano. Portanto, a usina fotovoltaica gera energia suficiente para compensar aproximadamente 56% do consumo da fábrica e o restante do consumo advém da empresa de energia elétrica (Energisa).

Com base nesse excedente de consumo e no fator de emissão do Sistema Interligado Nacional (SIN) relativo ao ano de referência, o total de dióxido de carbono emitido pelo uso da energia elétrica foi de 7.882,57 kg CO₂.

O fator de emissão é uma variável totalmente dependente da quantidade de carbono que o país emite no setor elétrico. Em 2023 houve a menor taxa desde 2012 segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Informação (MCTI). Essa melhora é atribuída à entrada de fontes limpas, renováveis, e o cenário hídrico bastante favorável, reduzindo o uso de combustíveis fósseis na produção energética (MME,2024).

Entretanto, o cenário com as mudanças climáticas pode afetar significativamente a matriz energética brasileira. As fontes renováveis representam 70% da matriz, principalmente a hidrelétrica. A mudança recente de La nina para El nino, está causando uma mudança na gestão de chuvas. O sul e sudeste do país estão recebendo chuvas torrenciais, enquanto o norte está com pluviosidade bem menor (AES, 2024). Com isso, em um cenário futuro pode haver um déficit na geração elétrica, havendo a necessidade de recorrer a termelétricas, que comumente usam óleo diesel e gás natural. Portanto, esse cenário elevaria o fator de emissão do SIN, aumentando os níveis de emissões indiretas por parte do consumo de eletricidade da fábrica.

5.1.2 COMBUSTÍVEL FÓSSIL

Em 2023 foram consumidos pela fábrica 7200 litros de diesel (6,048 toneladas) pelos caminhões e 2,50 toneladas de GLP pela cozinha. Convertendo em unidade de energia, esses consumos correspondem respectivamente 255,58 TJ e 116,1 TJ. Utilizando o fator de emissão correspondente, tem-se que o total de emissão de gás carbônico proveniente da queima do Diesel e do GLP foi, respectivamente, 18.938,48 e 7.325,91 kg de CO₂.

O diesel tem um fator de emissão 17% maior que o GLP, isso se explica porque o diesel é composto por cadeias de hidrocarbonetos longas e pesadas, havendo uma quantidade maior de átomos de carbono por moléculas. O GLP, por sua vez, é composto principalmente de propano (C₃H₈) e butano (C₄H₁₀) e outros hidrocarbonetos mais leves. Essa diferença estrutural resulta em uma maior emissão de CO₂ por unidade de energia a partir do diesel.

A quantidade de diesel utilizada é mais que o dobro de GLP. Sendo ambos de origem fóssil e com capacidade de liberar grandes quantidades de carbono por queima, a queima de diesel é uma fonte relevante para as emissões da fábrica de móveis estudada. A busca por meios de redução do consumo ou substituição por biocombustíveis é uma forma de minimizar os impactos associados.

5.1.3 RESÍDUOS

Os dados de resíduos, disponibilizados pela fábrica, provêm do Relatório de Atividades Potencialmente Poluidoras, que a fábrica precisa declarar anualmente ao IBAMA. Além disso, alguns dados complementares advieram do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), com ano de referência em 2023. Na Tabela 3 estão as quantidades de resíduo em toneladas por ano, dados estes que foram necessários para a modelagem com base no decaimento de primeira ordem dos resíduos sólidos urbanos, como os restos de alimentos, os papéis e os têxteis.

Para o pó de serra e fragmentos de MDF só se utilizou o valor de 2023, com base na metodologia do IPCC referente a incineração, devido à liberação de CO₂ ser imediata com o coprocessamento, não havendo acumulação de carbono ao longo da série histórica de destinações.

Tabela 3: Resíduos orgânicos degradáveis gerados em 2023.

Resíduos	Massa (t/ano)					
Ano	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Pó de serra	70,50	71,50	89,00	78,75	80,50	84,00
Fragmentos de MDF	1,50	1,50	2,75	2,25	2,30	2,40
Restos de alimentos	0,22	0,15	0,24	0,18	0,20	0,22
Papel	0,36	0,23	0,14	0,25	0,30	0,36
Têxteis	0,30	0,22	0,30	0,24	0,28	0,30

Fonte: Autor, 2024.

a) RESTOS DE ALIMENTOS

Os restos de alimentos, que são gerados majoritariamente na cozinha e no refeitório, correspondem a menor parcela disposta em aterro sanitário entre os resíduos. Além disso, é o tipo de resíduo com menor porcentagem de carbono orgânico degradável (15%), apesar de possuir a maior taxa de decomposição em condições anaeróbias (70%) em relação aos demais resíduos do aterro.

Na Figura 6 está representado o carbono orgânico degradável decomponível (CODD) acumulado e o CH₄ produzido ao longo dos 5 anos de destinação de restos de alimentos da fábrica. A curva de acúmulo ao decorrer dos anos é crescente apesar de não ter havido um aumento na geração desse tipo de resíduo desde 2018. Caso mantenha a média de produção ao longo dos anos, essa curva se estabilizará em 14 quilos de metano a partir de 2025, considerando a meia vida dos alimentos de 1,7 anos, com base no IPCC.

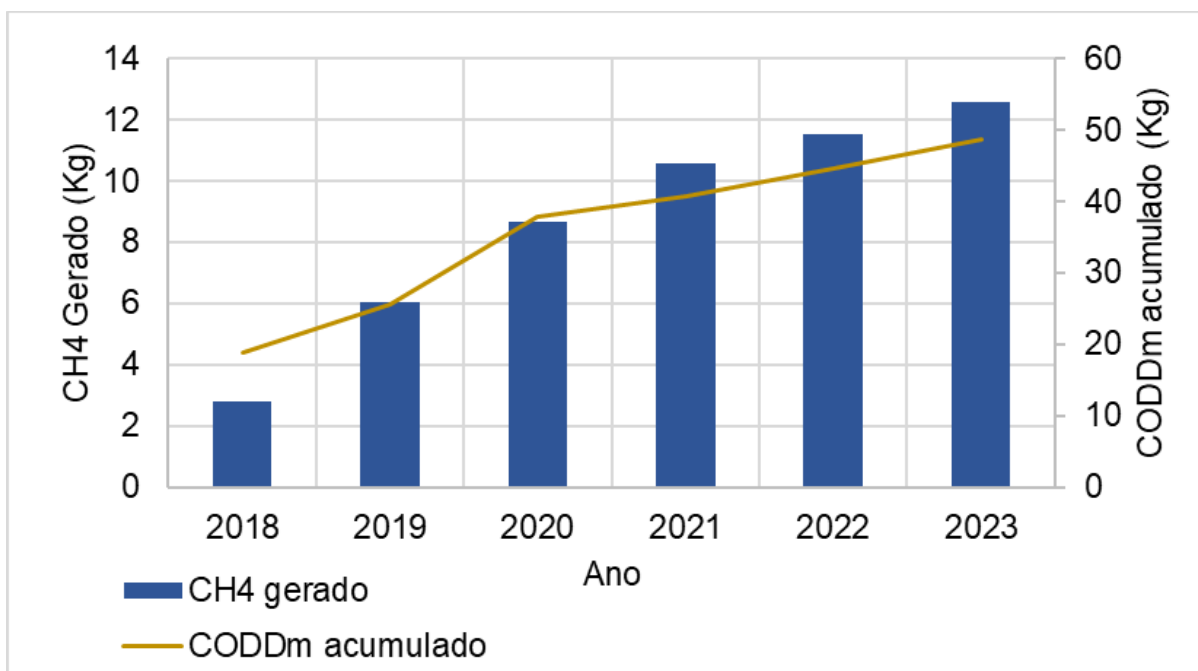
O total de metano emitido em 2023 por restos de alimentos advindos da fábrica dispostos no aterro foi 13 quilos. Apesar de o metano gerado não ser o mesmo emitido em aterro, devido a própria retenção do sistema e a processos como aproveitamento energético, dados de recuperação e tratamento do metano, como a queima, não estão disponíveis.

A massa de carbono orgânico degradável decomponível (CODDm) aumentou de 19kg em 2018 para 50 kg em 2023, evidenciando o efeito acumulativo do carbono. Nesse período, a taxa de emissão de metano mais que quadruplicou, saindo de 3 kg para 13 kg, apesar de a taxa de deposição de resto de alimento ter variado pouco.

Apesar de ser de origem biogênico, o metano é um gás relevante para o aquecimento global e tem o mesmo impacto que o metano de origem fóssil. As emissões de metano biogênico podem ter um impacto considerável no aquecimento global a curto e médio prazo, por seu ciclo

atmosférico durar entre 8 a 12 anos, para então ser transformado em CO₂ biogênico, que não contribui para o aumento da concentração desse gás a longo prazo.

Figura 6: CODDm acumulado e CH₄ gerado pela disposição de restos de alimentos



Fonte: Autor, 2024.

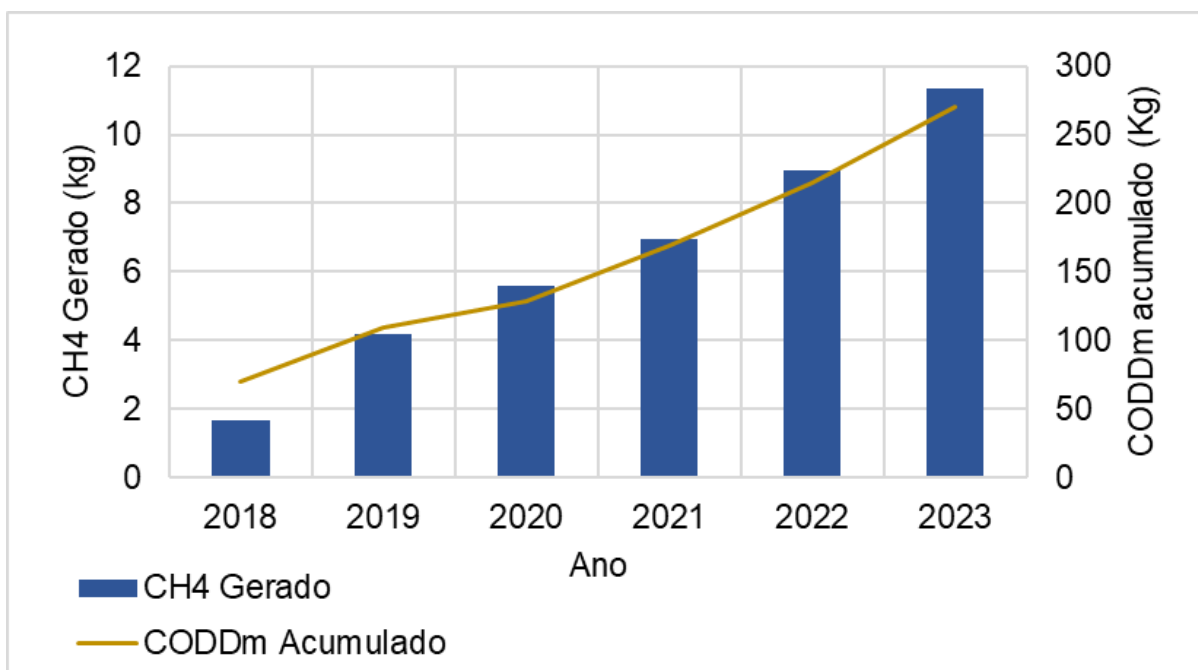
b) PAPÉIS

A quantidade de papel depositado anualmente varia, com uma queda significativa em 2020 (140 kg) e picos em 2018 e 2023 (360 kg). A geração de metano, no entanto, depende mais da acumulação de matéria orgânica degradável ao longo dos anos. Mesmo em anos em que a deposição é menor, como em 2020, as emissões de metano continuam a aumentar devido à decomposição progressiva de papel em anos anteriores (figura 7).

A produção de metano decorrentes da disposição de papéis em aterro em 2023 foi de 11 quilos. Caso a taxa de disposição de papéis em aterro se mantenha ao longo dos anos, essa curva só irá se estabilizar em 2054, um período consideravelmente mais longo que os restos de alimentos. Isso ocorre devido ao tempo de meia vida do papel ser 9,9 anos, segundo o IPCC, aproximadamente 6 vezes maior que os alimentos.

Devido a decomposição lenta do papel, a taxa acumulativa se torna maior. Em 2018 havia 70 kg de CODDm e em 6 anos passou a ser 270, aumentando 200 kg. Esse aumento progressivo tende a se manter ao longo dos anos. Para mitigar essa crescente, deve-se valer de outra destinação para esse resíduo, de modo a reciclar o carbono presente nele.

Figura 7: CODD acumulado e CH4 gerado pela disposição de papéis



Fonte: Autor 2024.

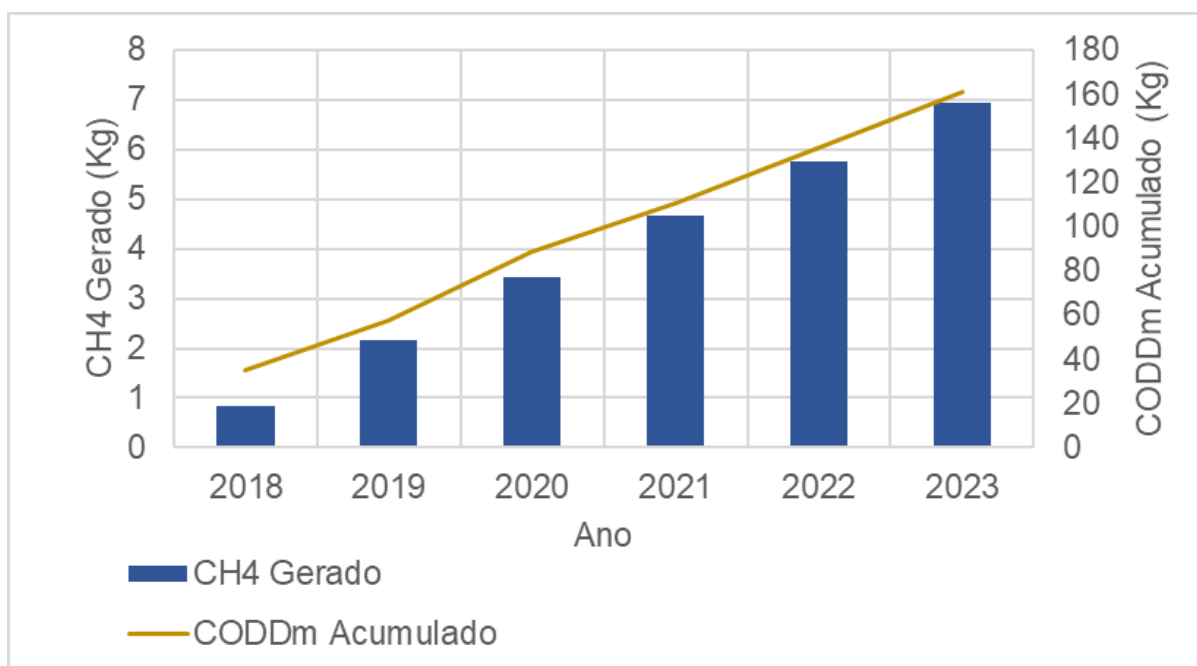
c) RESÍDUOS TÊXTEIS

Os resíduos têxteis da fábrica são principalmente trapos utilizados na câmara de pintura. Logo, esse tipo de resíduo vem agregado a restos de tinta e solventes, o que requer uma atenção quanto a destinação, pela possibilidade da presença de contaminantes como metais pesados. Além disso, é preciso considerar que esse material já advém da reutilização de materiais têxteis, o que provavelmente já desgastou as fibras de tecido, não sendo viável a reciclagem.

Os resíduos têxteis depositados e acumulados ao longo da série histórica produziram 7 quilos de metano em 2023 (Figura 8). A geração é relativamente menor comparada aos outros resíduos, isso por ter menores quantidades de matéria depositada.

Os têxteis possuem meia vida semelhante ao papel, segundo o IPCC. Logo, o processo de decomposição é mais lento, promovendo um efeito cumulativo mais evidente e demorado. Caso a taxa de deposição desse resíduo permaneça constante ao longo dos anos, o pico de emissão se estabilizará em 2040, com 19 kg de carbono emitido no ano.

Figura 8: CODD acumulado e CH4 gerado pela disposição de têxteis



Fonte: Autor 2024.

d) FRAGMENTOS DE MDF E PÓ DE SERRA

Com base nas quantidades de resíduos gerada em 2023 (tabela 3) e na metodologia de incineração de resíduos do IPCC, o total de dióxido de carbono gerado para os fragmentos de MDF e o pó de serra foram respectivamente 3,19 toneladas e 111,78 toneladas.

Esses dois resíduos são de mesma composição química, mudando apenas a granulometria. Podem ser tratados de forma semelhantes, facilitando a gestão dos resíduos. Juntos, compõe as fontes que geram maior quantidade de CO₂ equivalente do estudo.

5.1.4 ESGOTO

A fábrica possui 75 funcionários, contando com os administradores. São 44 horas semanais trabalhadas. Considerando que o ano de 2023 teve 52 semanas, e que os trabalhadores se reservam do direito de 1 mês de férias, são 48 semanas trabalhadas. Portanto a quantidade de dias equivalentes trabalhados (D) é de 88 dias. Logo, a carga orgânica total gerada pela fábrica foi de 366,4 Kg DBO/ano. Considerando-se o fluxo de tratamento de esgoto da indústria desde a fossa até a ETE Santa Rita, na Tabela 4 tem-se os valores das emissões de carbono em cada etapa do tratamento.

Tabela 4: Emissões de carbono por etapa de tratamento de esgoto gerado na indústria de móveis

Tipo de tratamento	TOW (kg DBO)	FE (kg/kg)	Emissões (kg CH ₄)
Fossa	366,40	0,3	109,92
Lagoa anaeróbia	256,48	0,48	123,11
Lagoa facultativa	115,42	0,12	13,85
Lagoa de maturação	23,08	0,12	2,77
Total			249,65

Fonte: Autor, 2024.

A fossa, localizada na fábrica, recebe toda a carga orgânica do esgoto, que posteriormente é encaminhada por caminhões fossa para a ETE Santa Rita. A cada etapa há a redução da carga, que é o esperado pelo tratamento. Consequentemente há uma redução gradual da quantidade de emissões, até o valor se estabilizar.

A metodologia do IPCC não considera emissões de tratamento preliminar, da rede coletora e da carga orgânica remanescente que sobrou do tratamento. Tais etapas poderiam trazer uma contribuição adicional, mas não seria um acréscimo impactante, devido ao processo biológico não ocorrer em intensidade.

5.2 PROPOSTA DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CARBONO

5.2.1 COMPARATIVO ENTRE AS EMISSÕES

Antes de definir a estratégia para redução das emissões, é preciso entender qual fonte está gerando o maior impacto. Essa análise deve considerar fatores importantes, quanto a origem do tipo de emissão (fóssil ou biogênica), qual GEE é emitido (CO₂ ou CH₄) e a quantidade, que será comparada através do CO₂ equivalente, que é a multiplicação da quantidade de GEE emitida pelo seu respectivo potencial de aquecimento global (GWP).

Através da Tabela 5 é perceptível que no total foram contabilizadas 3 fontes com emissões de origem fóssil e 6 com de origem biogênica. Sendo de origem fóssil, se torna um fator relevante, devido ao carbono dos combustíveis fósseis ter estado milhares de anos aprisionado, e a sua liberação aumentar a concentração atmosférica de GEE em longo prazo. Os impactos do carbono biogênico são de curto e médio prazo, por advirem de biomassa, que possui um ciclo de vida curto. Logo o processo de sequestro de carbono pela fotossíntese e retorno desse a atmosfera, seja por queima ou decomposição, é um processo rápido, em

comparação ao tempo geológico, havendo um balanço neutro em acréscimo da concentração atmosférica.

Tabela 5: Comparação entre as fontes de emissão de carbono da fábrica em 2023.

Fontes de emissão	Origem	Gás emitido	CO2 equivalente (kg)
Energia Elétrica	Fóssil	CO2	7.882,00
Diesel	Fóssil	CO2	18.938,00
GLP	Fóssil	CO2	7.325,00
Fragmentos de MDF	Biogênica	CO2	3.190,00
Pó de Serra	Biogênica	CO2	111.780,00
Papel	Biogênica	CH4	308,00
Resto de alimentos	Biogênica	CH4	364,00
Têxtil	Biogênica	CH4	196,00
Esgoto	Biogênica	CH4	6.972,00

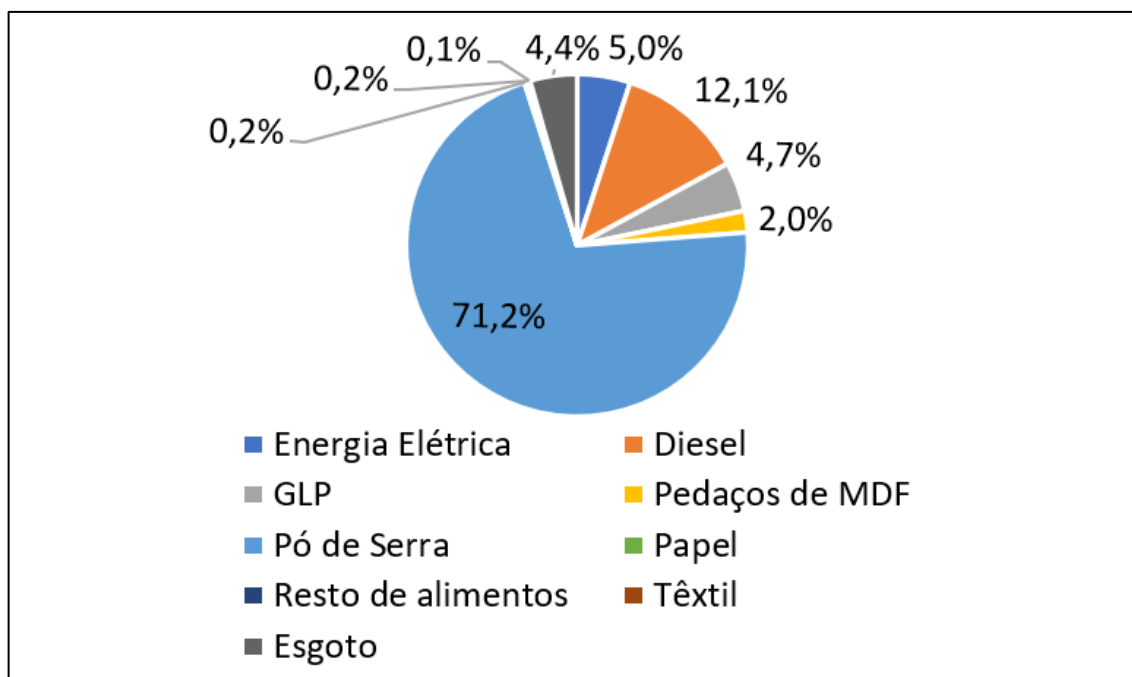
Fonte: Autor, 2024.

Segundo Pinto (2022) os impactos do metano biogênico e fóssil são iguais, por promoverem o mesmo aquecimento atmosférico. Sendo o metano um gás com potencial de aquecimento global 28 vezes maior que o CO2 (IPCC, 2013), precisa-se ser abordado com cuidado. O CH4 de origem fóssil irá ser convertido em CO2 após o tempo atmosférico do metano (12 anos em média), acrescentando uma parcela que há muito tempo não participava dessa interação climática.

Não só as características do gás devem ser levadas em consideração na determinação das fontes mais impactantes. É notório o quando as quantidades de cada fonte destoam entre si, e essa diferença é evidenciada na Figura 9.

O pó de serra é responsável por 71,2% das emissões consideradas nesse estudo. Quase todas as etapas de processamento do MDF têm algum tipo de corte que gere o pó de serra. Todos os cortes são feitos por máquinas programadas, logo é inevitável a produção desse resíduo. Poder-se-ia pensar em alguma forma de reduzir essa geração de resíduo, como as máquinas de corte, na etapa 2, já preverem o corte de 1 milímetro que iria ser realizado na etapa 3 de fitamento.

Apesar de ser de origem biogênica, esse carbono poderia passar ainda muitos anos compondo o MDF. A sua queima, que emite CO2 instantaneamente, eleva os níveis de GEE local, aquecendo o ambiente e modificando o microclima local, portanto se torna uma fonte importante de se pensar uma estratégia de redução. Não há qualquer tipo de aproveitamento ou reciclagem desse material previsto pela fábrica

Figura 9: Percentual de CO₂ equivalente emitido por cada fonte.

Fonte: Autor, 2024.

O uso de Diesel como combustível é a segunda maior fonte de emissão da fábrica em estudo. Existe ainda o agravante de ser um carbono fóssil, que irá impactar a pequeno, médio e longo prazo. Esse uso advém da necessidade de se utilizar os caminhões, para transporte de materiais e dos móveis já processados. Meios de otimização de logística reduziram essa demanda energética, além de favorecer uma economia financeira, mas esse tipo de abordagem não é medido nesse estudo.

A terceira maior fonte da fábrica estudada é a emissão indireta do consumo de energia elétrica. Sabendo que as termelétricas acionadas na margem do sistema de geração elétrica brasileira utilizam combustíveis fósseis majoritariamente, o consumo dessa energia justifica essa produção. Mesmo com o sistema fotovoltaico da fábrica, que já reduziu consideravelmente essa demanda externa, o uso de eletricidade ainda é relevante de ser considerado.

5.2.2 ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES

Diante do arcabouço de alternativas de redução e das tecnologias emergentes, que em breve estarão no mercado, algumas opções são mais fáceis de serem aplicadas a curto prazo, enquanto outras vão demandar tempo. Portanto, a estratégia proposta para a fábrica foi dividida em alternativas de curto prazo e de médio/longo prazo (Quadro 4), como forma de nortear futuras ações dos administradores da fábrica.

Quadro 4: Redução nas emissões por fonte através das soluções de curto e médio/longo prazo para a fábrica.

Fonte de emissão atual	Curto prazo		Médio/Longo prazo	
	Alternativa	Redução nas emissões	Alternativa	Redução nas emissões
Consumo de Energia elétrica	Energia fotovoltaica	50%	-----	-----
Queima de pó de serra	Compostagem	84%	-----	-----
Queima de pedaços de MDF	Compostagem	84%	-----	-----
Resíduos de Papel	Compostagem	75%	Biodigestor	84%
Restos de alimento	Compostagem	87%	Biodigestor	91%
Uso de Diesel como combustível	-----	-----	Atualização da frota	67%*
GLP como gás de cozinha	-----	-----	Biogás	100%**

*Valor de referência de carros elétricos, falta informações específica sobre caminhões elétricos;

**O valor de 100% é para evitar dupla contagem, pois a emissão da queima foi considerada na destinação dos resíduos destinados ao biodigestor.

Fonte: Autor, 2024.

A seguir uma breve abordagem de cada alternativa de redução das emissões individualmente, e finaliza trazendo a redução geral promovida pela estratégia.

a) ENERGIA FOTOVOLTAICA

Sendo o consumo de energia a terceira maior fonte de emissão de GEE na fábrica, a ampliação do sistema fotovoltaico existente minimizaria a demanda por energia advinda da distribuição, o que evitaria ainda mais a demanda de produção elétrica, exigindo menor produção de energia através de termelétricas.

O consumo de energia da rede de distribuição em 2023 foi 204.742,06 kwh, que é um valor alto comparado ao consumo doméstico e razoável ao consumo industrial. Considerando que a maior parte das fábricas de móveis no Brasil são de pequeno porte, esse excedente de consumo ainda é bem superior à média de mercado, o que se justifica pelo fato da fábrica ser de médio porte, com grandes produções anuais.

A ampliação do sistema de forma a fazer a cobertura de todo o consumo da fábrica zera as emissões do consumo de energia advinda da rede de distribuição, porém a produção e transporte dos equipamentos, principalmente painéis solares e inversores, que a maioria advém da china, emitem carbono, que precisa ser considerado. Segundo Müller et al. (2021), o fator de emissão de todo esse processo para o sistema fotovoltaico é de 810kg CO₂-eq/kWp.

Considerando o consumo supracitado, a irradiação solar diária média de 5,47 kWh/m².dia (CRESESB, 2024), e eficiência do sistema fotovoltaico de 80%, a potência

necessária para zerar o consumo de energia elétrica da rede é de 130 kWp. Portanto, caso seja instalado a miniusina, a emissão de CO₂ equivalente é de 105,3 toneladas.

Esse valor é aproximadamente 13 vezes maior que a emissão do consumo de eletricidade do ano de 2023. Apesar disso, é preciso considerar que a vida útil dos painéis fotovoltaicos é de 25-30 anos, enquanto que os inversores duram em média 10 a 15 anos, podendo chegar a 20 anos (ABSOLAR), e que essa emissão é uma medida única que representa o impacto de todo processo. Portanto, atribuindo uma média de 25 anos, se for distribuir a emissão para os anos de geração elétrica, tem-se que a cada ano seria emitido 4,2 toneladas de CO₂ equivalente, o que é aproximadamente metade das emissões de 2023.

b) COMPOSTAGEM

Ao considerar a necessidade de encontrar uma alternativa para a destinação do pó de serra, que vem sendo destinado para a queima em coprocessamento, sendo praticamente todo carbono convertido em CO₂ através da combustão, a compostagem é uma técnica apropriada para reduzir as emissões dessa fonte. Além do pó de serra os fragmentos de MDF, restos de alimentos e o papel podem ter este mesmo aproveitamento.

Deve-se considerar que é necessário fazer o correto manejo da compostagem, caso contrário haverá condições anaeróbias e consequentemente produção de metano. Segundo Andersen et al. (2010), o fator de emissão médio de CO₂ para o processo de compostagem é de 215 kg CO₂/t. Esse fator representa uma redução das emissões das fontes supracitadas (Tabela 6).

Tabela 6: Redução das emissões através da compostagem

Resíduos	Emissões 2023 (kg de CO ₂ eq)		Redução das emissões
	Destinos atuais	Destino: compostagem	
Pó de Serra	111.700	18.060	84%
Fragmentos de MDF	3.190	519	84%
Papel	308	77	75%
Restos de alimento	364	47	87%

Fonte: Autor, 2024.

Os restos de alimentos, enquanto resíduos úmidos, auxiliariam a aumentar a umidade das leiras, melhorando as condições para a decomposição dos microrganismos, mas é evidente que a quantidade desse material é insuficiente, por a geração de pó de serra ser quase 400 vezes maior. A associação do pó de serra com outros resíduos gerados de outras industriais, principalmente do setor agropecuário, é uma solução apropriada. Fernandes e Chohfi (2010)

realizaram uma pesquisa sobre a compostagem envolvendo dejetos de suínos e maravalha de madeira, que é semelhante ao pó de serra, porém com partículas maiores. Outros trabalhos como Mendes (2019), que associou o pó de serra ao esterco de caprino, e Cotta et al. (2015), que associou ao esterco bovino e resíduos vegetais, demonstram que essa prática pode auxiliar a resolver problemas de resíduos sólidos de mais de uma organização.

O papel pode ser utilizado também na compostagem, como na pesquisa de Pereira, Eustáquio (2020) em que o composto produzido atendeu aos principais parâmetros de qualidade de compostos orgânicos da legislação brasileira. O uso de um composto de qualidade favorece a captura de carbono pelos processos de fotossíntese e crescimento vegetal, podendo servir de insumo para outras medidas compensatórias como a compensação ambiental por plantio de árvores.

c) BIODIGESTOR

A instalação de um biodigestor é uma outra alternativa interessante, pois será abastecido com os resíduos orgânicos, e gerará biogás, que poderá substituir o GLP como gás de cozinha. Além disso, ocupa uma área útil menor que as composteiras, aumentando a eficiência por metro quadrado.

Nesse tipo de solução, tem que haver cuidado com o resíduo que se utiliza, pois caso haja componentes químicos nocivos às bactérias anaeróbias, a eficiência do processo cairá.

A quantidade de biogás gerada no biodigestor varia de acordo com a tecnologia empregada. Na usina de Tilburg, na Holanda, por exemplo, a geração alcança 106m³ de biogás/t de resíduos. Já a fabricante de biodigestores Kompogas recomenda o valor médio de 120m³ de biogás por tonelada de material orgânico (Soares, 2021).

Para fazer uma estimativa de quanto o biogás produzido substituiria o GLP é preciso comparar os poderes caloríficos inferiores de cada gás, que mede o quanto de calor é liberado na queima. O poder calorífico do biogás, segundo Anushua et al. (2020) é de 20.799 kJ/m³. Já o do GLP, segundo Mustaffa et al. (2019), é de 45.600 kJ/kg. Logo, 1 m³ de biogás equivale a 0,46 kg de GLP, valor este que se aproxima ao de Guiducci et al. (2023) de 0,45kg GLP/m³ de biogás.

Caso fosse utilizado apenas os restos de alimentos gerados em 2023 no biodigestor, utilizando a o fator de emissão do IPCC (2019) de 54,6 kg CO₂/GJ, a queima do biogás emitiria 29,98 kg de CO₂, o que seria uma redução de 91% em relação a destinação anterior, gerando a quantidade de 26,4 m³. Isso equivale a 12,14 kg de GLP, o que é aproximadamente o peso de um botijão de gás (13kg), sendo uma quantidade baixa para justificar o uso da tecnologia. O

biogás gerado seria totalmente utilizado como gás de cozinha, portanto deve-se evitar dupla contagem das emissões.

A utilização de outros compostos orgânicos aumentaria essa produção de biogás. No caso dos resíduos de MDF, se torna inviável a utilização, pois segundo a resolução nº 370/2018 do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA), não deve ser utilizado como fonte energética para fins alimentícios, devido ao formaldeído, que é uma substância nociva à saúde humana.

Outros tipos de resíduos podem ser utilizados, principalmente os gerados na agropecuária da região, como esterco bovino, aviário e suíno (Pelembe, 2023), mas para isso, precisaria haver uma parceria externa com um produtor agropecuário. Havendo geração suficiente, seria possível substituir 100% do GLP utilizado atualmente. Com isso, necessitaria de 5.481 m³ de biogás para substituir a demanda de 2023 de 2,5 toneladas de GLP, que ao ser queimado emitiria 6.224 quilos de CO₂. Toda essa emissão provém da degradação dos resíduos no biodigestor, portanto, se for contabilizado na parte de resíduos, a emissão da queima de biogás é nula, para evitar contagem dupla.

d) ADEQUAÇÃO DA FROTA ÀS TECNOLOGIAS EMERGENTES

A substituição das tecnologias que usam combustível fóssil por aquelas que utilizam energias renováveis está sendo cada vez mais estimulada, para alcançar as metas do Acordo de Paris. Porém, ainda existem muitos desafios tecnológicos, que vem sendo enfrentado pelo desenvolvimento e inovação do setor.

Para a fábrica estudada, que utiliza de caminhões de motores à diesel, essa é uma alternativa importante. Entretanto o comércio de caminhões elétricos ainda não é tão acessível no Brasil, enquanto que na Europa está mais avançado. Conforme políticas vão sendo criadas e a tecnologia vai sendo desenvolvida, o acesso a esse meio de transporte elétrico aumentará. Por esse motivo, essa alternativa é proposta para ser de médio/longo prazo. Enquanto isso, poder-se-ia prezar pela otimização da logística do transporte da fábrica, de modo a evitar uso excessivo dos caminhões.

e) RECICLAGEM

A reciclagem do papel faz com que a maior parte do carbono seja reinserido como um novo produto, evitando a emissão de metano que a decomposição anaeróbia no aterro sanitário promoveria. Além disso, evita a perda de carbono na extração de novas matérias primas, que deixariam de ser necessárias.

Apesar dessas remoções, o processo de reciclagem do papel envolve uma sequência de etapas, e entre elas há o consumo de combustível, para geração de calor e eletricidade. O fator de emissão vai depender da eficiência da tecnologia empregada e da qualidade de manejo de produção. Por não haver acesso a dados de emissão sobre essa atividade na região, não sendo viável estimar as reduções, essa alternativa não foi incluída nesse estudo.

5.2.3 REDUÇÃO GERAL DAS EMISSÕES DE CARBONO

O Quadro 5 traz todos os dados de emissão levantados nesse estudo, e as emissões de cada fonte caso haja a adoção das alternativas de curto e médio/longo prazo.

Quadro 5: Análise comparativa das emissões das alternativas de curto e médio/longo prazo

Fonte de emissão	Emissões 2023 (kg de CO ₂ eq)*		
	Destino atual	Adoção das alternativas de curto prazo	Inclusão das alternativas de longo prazo
Energia Elétrica	7.882	4.200	4.200
Pó de serra	111.780	18.060	18.060
Pedaços de MDF	3.190	519	519
Resíduos de Papel	308	77	49
Restos de alimento	364	47	30
Diesel	18.938	18.938	6.249
GLP	7.325	7.325	0
Resíduos têxteis	196	196	196
Esgoto	6.972	6.972	6.972
Total emissões	156.955	56.334	36.275
Redução total	0%	64%	77%
Legenda:  Valores sem nenhuma alternativa aplicada  Valores com a aplicação das alternativas de curto prazo  Valores com a aplicação das alternativas de médio/longo prazo			

Fonte: Autor, 2024.

O total de CO₂ equivalente emitido pela fábrica em 2023, limitando-se às fontes de emissão consideradas nesse estudo, foi de 156.955 kg de CO₂ equivalente. Caso em 2023 a fábrica tivesse aplicado as alternativas de curto prazo, o total emitido teria sido 56.334 kg de CO₂ equivalente, o que corresponde uma redução total de 64%. Ademais, caso seja incluído as alternativas de médio/longo prazo, preservando as de curto prazo para energia elétrica, pó de serra e pedaços de MDF, a emissão total seria de 36.275 kg de CO₂ equivalente, o que corresponde uma redução de 77% de todas as emissões.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÃO

A metodologia do *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, que foi produzida para inventários nacionais, foi satisfatória ao ser aplicada no cálculo das emissões da fábrica de móveis, o que revela a sua adaptabilidade para inventários corporativos.

A principal fonte de emissão da fábrica estudada advém da queima de derivados de MDF, que é gerado em grande quantidade, o que comprova que a geração de resíduos é um aspecto relevante no setor moveleiro. O coprocessamento não é a destinação mais adequada para este tipo de resíduo, por emitir instantaneamente o carbono nele presente, que poderia ser reciclado pelo processo da compostagem. Destinar os derivados de MDF e os orgânicos (papel e restos de alimentos) na compostagem promoveria uma redução média de 83% nas emissões de CO₂.

Além disso, o setor moveleiro como um todo é um grande consumidor de energia elétrica, o que pode ser compensado com a geração fotovoltaica, em que a emissão de carbono é proveniente apenas do processo de fabricação e transporte dos equipamentos. Logo, caso seja feita uma expansão no sistema de energia solar da fábrica, haverá uma redução de 47% nas emissões de carbono dessa fonte.

A liberação de carbono fóssil é mais relevante para o aumento das mudanças climáticas do que o carbono biogênico, por aumentar a concentração de GEE atmosférico a longo prazo. Portanto, a substituição de combustíveis fósseis é importante para frear o aumento do aquecimento global. Porém, no caso do Diesel, ainda há desafios tecnológicos para a substituição de frota e espera-se que a médio/longo prazo caminhões elétricos estejam acessíveis ao mercado.

No caso do GLP, a redução é possível através do uso de biogás, produzido em biodigestor, que é uma alternativa eficaz a ser implantada a longo prazo, em parceria com um fornecedor de resíduos agropecuários, havendo a redução de 84% das emissões dos resíduos de papel e 91% das emissões de resto de alimentos, com base nas quantidades geradas em 2023, e traria benefícios econômicos com o corte de gastos para a cozinha com botijões de GLP, além de auxiliar no gerenciamento de resíduos de outra corporação.

Os resultados demonstram a viabilidade da aplicação de estratégia de redução da emissão de carbono em fábricas de móveis. Com as alternativas de curto prazo abordadas, é possível reduzir aproximadamente 64% de todas as emissões de carbono da fábrica estudada e,

com a inclusão das alternativas de médio/longo prazo essa redução seria 77%, o que contribui de forma significativa com a mitigação das mudanças climáticas.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Como recomendações para futuras pesquisas sugere-se utilizar outra metodologia de cálculo das emissões de carbono, de preferência uma desenvolvida para inventários corporativos, a fim de comparar com os resultados desse estudo, que teve por base o IPCC.

Além disso, devido a grande quantidade de resíduos gerados no setor moveleiro, faz-se necessário estudos que abordem fatores de emissão inerentes aos processos de reciclagem de materiais, como o papel, de modo que contemplem os diferentes métodos e qualidades de processamento desse resíduo, com o objetivo de avaliar o quanto essa alternativa reduziria as emissões dos resíduos da fábrica de móveis.

De forma complementar, poder-se-ia calcular as emissões provenientes de fontes que não são da administração direta da fábrica, como o deslocamento particular dos funcionários e das empresas terceirizadas, e verificar como políticas de educação ambiental podem impactar a redução das emissões desse setor.

7 REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, NBR 8419. Rio de Janeiro. 1992.

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Aneel vai reduzir burocracia para facilitar instalação de sistema solar em residência. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/>. Acesso em: 30 de setembro de 2024.

AES BRASIL. Relatório Integrado de Sustentabilidade: 2023. 2024.

AGÊNCIA BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia lança programa do biodiesel. Agência Brasil. 2021. Disponível em: <<http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/nod e/577594>>.

AGUIAR, Lúcia Vaz; FORTES, Julio Domingos Nunes; MARTINS, Eduardo. Neutralização compensatória de carbono-estudo de caso: indústria do setor metal mecânico, Rio de Janeiro (RJ). Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 21, n. 01, p. 197-205, 2016.

ALMEIDA, Risely Ferraz de et al. Emissão de óxido nitroso em solos com diferentes usos e manejos: Uma revisão. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 8, n. 2, p. 441-461, 2015.

ALPINO, Tais de Moura Ariza et al. Os impactos das mudanças climáticas na Segurança Alimentar e Nutricional: uma revisão da literatura. Ciência & Saúde Coletiva, v. 27, n. 01, p. 273-286, 2022.

ANDERSEN, Jacob Kragh et al. Greenhouse gas emissions from home composting of organic household waste. Waste Management, v. 30, n. 12, p. 2475-2482, 2010.

ANDRADE, Mário Cesar da Silva; ANGELUCCI, Paola Durso. Refugiados ambientais: mudanças climáticas e responsabilidade internacional. Holos, v. 4, p. 189-196, 2016.

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres . RNTRC em Números. Disponível em: <<https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/cargas/rntrc-1/rntrc-em-numeros>>.2020.

ANUSHA, T. et al. Production of biogas from cow dung and determination of calorific value. International Research Journal of Engineering and Technology, v. 7, n. 03, p. 4956-4962, 2020.

AOYAGUE, Henry Yuzo Sasaki. Impactos dos veículos elétricos no sistema elétrico brasileiro e no meio ambiente. 2024.

AQUINO, Carla Nogueira Patrão de et al. Desacoplamento entre emissões de CO₂ e crescimento econômico no Brasil e em outros países. *Revista Vértices*, v. 19, n. 2, p. 23-52, 2017.

ARAÚJO, Ana Paula Caixeta. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico. 2017.

ASSAD, Eduardo Delgado et al. Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. *ILPF: Inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta*. Brasília, DF: Embrapa, p. 153-67, 2019.

BAPTISTA, Vinícius Ferreira. A relação entre o consumo e a escassez dos recursos naturais: uma abordagem histórica. *Saúde & Ambiente em Revista*, v. 5, n. 1, p. 8-14, 2010.

BASSO, Camila Regina. Apropriações de conceitos de ecologia por meio da transcodificação entre representações 3D e verbal feitas por estudantes do ensino fundamental. 2014.

BEUREN, Fernanda. Utilização de diferentes tipos de resíduos agroindustriais como substrato na compostagem de bio sólido industrial. 2019.

BRANCO, José Eduardo Holler et al. Ações e políticas para redução da emissão de CO₂ no transporte de cargas do Brasil. *TRANSPORTES*, v. 31, n. 2, p. e2415-e2415, 2023.

BRASIL, Ministério da Infraestrutura, Empresa de Planejamento e Logística – EPL. Diagnóstico Logístico – 2010-2018. Brasília: EPL. 2019.

BRASIL. Lei nº 12.305. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]*, Brasília, DF. 2010. Acesso em: 23 de setembro de 2024.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. 2017. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

CONSEMA, Resolução, nº 370. 2017. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201712/21112355-370-2017-regramento-uso-mdf-mdp-como-combustivel.pdf>

COTTA, Jussara Aparecida de Oliveira et al. Compostagem versus vermicompostagem: comparação das técnicas utilizando resíduos vegetais, esterco bovino e serragem. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 20, n. 1, p. 65-78, 2015.

CUNHA, Tony Jarbas da; MENDES, Alessandra Monteiro Salviano; GIONGO, Vanderlise. Matéria Orgânica do Solo. Embrapa. 2015.

DAHLIA, Lia et al. Rapid Identification Of Climate Change Impacts On The West Tarum Channel. Jurnal Review Pendidikan dan Pengajaran (JRPP), v. 7, n. 4, p. 13857-13865, 2024.

EPE- Empresa de Pesquisa Energética. BEN, Relatório Síntese 2024: Ano base 2023. 2023.

FERNANDES, Felipe Jurça; CHOIFI, Felipe Moreton. Determinação da mistura ótima para compostagem de dejetos suínos utilizando maravalha de madeira. Revista Agrogeoambiental, 2010.

FIGUEIREDO, R.T.; BRITO, M.J.C.; SANTOS, P.H.C.; SOARES, C.M.F.; BURLE, E.C. Monitoring of small scale composting. SEMIOSES: Inovação, Desenvolvimento e Sustentabilidade, Rio de Janeiro, v. 13., n. 3., p.98-107, 2019.

FILONCHYK, Mikalai; PETERSON, Michael P.; ZHANG, Lifeng; HURYNOVICH, Volha; HE, Yi. *Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O*. Science of The Total Environment, v. 935, p. 173359, 2024. ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173359>. Acesso em: 19 set. 2024.

FREIRE, A. L. F. et al. Impactos ambientais de painéis de madeira e derivados: uma revisão de literatura. 2015.

FREITAS, L. M. C. Análise de materiais estruturantes e de recipientes usados para a compostagem doméstica. 2016. 94 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

FEPAM — Fundação Estadual de Proteção Ambiental. Lançamento de Efluentes. 2003

GHG Protocol. Metodologia do GHG Protocol da Agricultura. Greenhouse Gas Protocol, p. 1-54, 2014.

GOV.BR - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 13 set. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2020/anuario-2020-fatores-conversao.pdf/view>>.

GUIDUCCI, R. et al. Impacto econômico-ambiental da produção de biogás para consumo próprio em estabelecimentos agropecuários de pequeno e médio porte. 2023.

Greenhouse Gas Emissions. EPA - United States Environmental Protection Agency, 11 abr. 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>.

HACHEM, Brenda Melise MOrbach Paredes et al. Manual de orientação para uso do Biodigestor. Secretaria de meio ambiente e sustentabilidade. Governo do Pará. 2023.

ICCT - The Internacional Council on Clean Transportation. Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil. 2023.

INÁCIO, C. de T. Dinâmica de gases e emissões de metano na compostagem de resíduos orgânicos. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) — Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2010.

INFRA, Agência. Primeiros caminhões elétricos no Brasil começam a rodar em modelo de teste. 2024. Disponível em: <https://agenciainfra.com/blog/primeiros-caminhoes-eletricos-no-brasil-comecam-a-rodar-em-modelo-de-teste>.

IPEA — INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Agenda 2030: objetivos de desenvolvimento sustentável: avaliação do progresso das principais metas globais para o Brasil: ODS 13: tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos. Brasília: Ipea, 2024. 18 p. (Cadernos ODS, 13). DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/ri2024ODS13>

IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 21 set. 2024.

IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouses Gas Inventories. 2006

IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouses Gas Inventories. 2019.

IPCC. Fifth Assessment Report: Climate Change 2013 (AR5). Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.

IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada). Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Brasil, 2023. Disponível em: < <https://www.ipea.gov.br/ods/ods13.html>>. Acesso em 19 de setembro de 2024.

JUNGES, Alexandre Luis et al. Efeito estufa e aquecimento global: uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica. Experiências em Ensino de Ciências. Cuiabá. Vol. 13, n. 5 (dez. 2018), p. 126-151, 2018.

JUNIOR, Humberto Gallo et al. Compensação de emissões de co2 durante a 14ª semana nacional de ciência e tecnologia no vale do paraíba-sp. Biofix Scientific Journal, v. 3, n. 2, p. 311-318, 2018.

KAMIYAMA, HISSASHI. A complexidade do DBO. Revista DAE [online], v. 48, 1988.

Kunz, Airton. Processos de biodigestão. Curso de Energias Renováveis. Embrapa. 2017.

LEE, Hoesung et al. CLIMATE CHANGE 2023 synthesis report summary for policymakers. CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report: Summary for Policymakers, 2024.

LIMA JUNIOR, R. G. S. et a/. Avaliação de novas práticas de compostagem em pequena escala com aproveitamento energético. Engenharia Sanitária e Ambiental, [s.l.], v. 22, n. 2, p.361-370, 19 jan. 2017. FapUNIFESP (SciELO).

LIRA, Marcos Antônio Tavares et al. Contribuição dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica para a Redução de CO₂ no Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 34, p. 389-397, 2019.

MAPBIOMAS. Histórico do fogo no Brasil: resultado da coleção 3 do mapbiomas fogo (1985-2023). 2024.

MARTINEZ, Pedro Henrique Petrola. Mudanças climáticas e a necessidade de Emenda Constitucional: análise da PEC 44/2013. 2015.

MASSON-DELMOTTE, Valérie et al. Aquecimento Global de 1,5°C. IPCC: Sumário para formuladores de políticas. 2019.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Fatores de emissão MDL/SIN. Acesso em: 23 de setembro de 2024.

MME - Ministério de Minas e Energia. Geração de energia elétrica tem a menor emissão de CO₂ dos últimos onze anos. 2024. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202402/geracao-de-energia-eletrica-tem-a-menor-emissao-de-co2-dos-ultimos-onze-anos-1>. Acesso em: 23 de setembro de 2024.

MENDES, Ana Karolina de Souza. Compostagem de serragem com esterco de caprino e os efeitos do composto no sistema solo-planta. 2019.

MENEZES, Fredson Gomes de et al. O papel dos biodigestores na agropecuária para mitigação das mudanças climáticas: uma análise dos benefícios ambientais. 2023.

MÜLLER, Amelie et al. A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 230, p. 111277, 2021.

MUSTAFFA, Norrizal et al. Experimental analysis of liquid LPG injection on the combustion, performance and emissions in a spark ignition engine. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019. p. 012033.

NAÇÕES UNIDAS. Adoção do acordo Paris. Convenção Quadro sobre Mudança do Clima. 2015

NAÇÕES UNIDAS DO BRASIL. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>>

NBR, ABNT. 9648: 1986. Estudo de concepção de sistemas de esgoto sani, 1986.

NUVOLARI, Ariovaldo. Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola. Editora Blucher, 2021.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Análise das emissões de Gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil. 2023.

OECD; FAO. OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030. [s.l.] OECD, 2021.

OLIVEIRA, Celio; FERNANDES, João. Manual de compostagem doméstica com minhocas. Comercial Egitto, São Paulo, 2018.

OMM — Organização Meteorológica Mundial. State of the Global Climate 2023. 2023.

OTTONELLI, Janaina et al. Oportunidades e desafios do setor de energia solar fotovoltaica no Brasil. Revista Econômica do Nordeste, v. 52, n. 4, p. 8-26, 2021.

PELEMBE, Mácio Eduardo. Operacionalização de um biodigestor. 2023.

PENNA, C. G. O Estado do Planeta: Sociedade de Consumo e Degradação Ambiental. Record. Rio de Janeiro, 1999.

PEREIRA, María Carolina Romero; CORIA, Alba Sánchez. Impactos ambientales de sistemas de energía solar fotovoltaica: una revisión de análisis de ciclo de vida y otros estudios. Revista EIA, v. 19, n. 38, p. 24, 2022.

PEREIRA, Ricardo Tadeu Galvão; EUSTÁQUIO JR, Valdeir. Reciclagem de papel branco com uso de gongolo na compostagem: uma proposta de metodologia integradora no ensino de agroecologia. Cadernos de Agroecologia, v. 15, n. 2, 2020.

PERLIN, Ana Paula et al. Práticas de mitigação às mudanças climáticas e desempenho empresarial em indústrias brasileiras. *Environmental & Social Management Journal/Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 16, n. 1, 2022.

PINTO, Talita Priscila et al. Panorama das emissões de metano e implicações do uso de diferentes métricas. São Paulo: FGV, 2022.

PULROLNIK, Karina. Transformações do carbono no solo. 2009.

RAMOS, Wilson Fernandes et al. Análise da indústria madeireira na Amazônia: Gestão, uso e armazenamento de resíduos. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 2017.

RICARDO Energy & Environment. Heavy Duty Vehicles Technology Potential and Cost Study. Shoreham-by-Sea: Ricardo Energy & Environment. 2017.

ROGRIGUES, Mateus. Percentual de biodiesel no diesel passará de 12% para 14% em março e 15% em 2025, diz ministro. G1. 2023.

ROMEIRO, Laércio Kutianski José; PAULINO, Sonia Regina. Política nacional de biocombustíveis: limitações para a consideração de critérios socioambientais. *Revista de Gestao Social e Ambiental*, v. 18, n. 6, p. 01-10, 2024.

SÁNCHEZ, A. et al. Greenhouse gas emissions from organic waste composting. *Environmental Chemistry Letters*, [s.l.], v. 13, n. 3, p.223-238, 26 maio 2015. Springer Nature.

SANTOS, Átila Caldas. Geração de metano devido à digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos-Estudo de caso do Aterro Sanitário Metropolitano Centro, Salvador-BA. 2011.

SANTOS, Felipe Luiz Côpo dos. Projeto e construção de um biodigestor de baixo custo para pequenas propriedades rurais. 2023.

SANTOS, Felipe Affonso Dantas dos et al. Obtenção, tratamento e destinação de dióxido de carbono (CO₂) a partir de emissões gasosas de incineradores. TCC (Graduação)-Curso de Química Industrial, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SANTOS, Carlos Felipe Catorza da Silva et al. Compostagem como redutor de gases do efeito estufa, uma alternativa à disposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários. 2020.

SANTOS, Marcos Ronielly da Silva; VITORINO, Maria Isabel; PIMENTEL, Marcia Aparecida da Silva. Vulnerabilidade e mudanças climáticas: análise socioambiental em uma mesorregião da Amazônia. *Revista Ambiente & Água*, v. 12, p. 842-854, 2017.

SANTOS, Arantxa Carla da Silva; PONTES, Altem Nascimento. Emissões de gases de efeito estufa e mudanças climáticas no estado do Pará. *Educamazônia-Educação, Sociedade e Meio Ambiente*, v. 15, n. 1, jan-jun, p. 87-105, 2022.

SARDÁ, Luana G. et al. Redução da emissão de CO₂, CH₄ e H₂S através da compostagem de dejetos suínos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, p. 1008-1013, 2010.

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Plataforma. Referência do ano 2022. Acesso em: 01 de outubro de 2024.

SILVA, Bruno Garcia et al. REVISÃO DE METODOLOGIA DE ESTIMATIVA DE GEE ORIUNDOS DO TRATAMENTO DE ESGOTO SOB ÓTICA DE EMPRESAS DE SANEAMENTO, 2023.

SILVA, Karine Zortea; COLOMBO, Renata. Mudanças Climáticas: Influência antrópica, impactos e perspectivas. *Journal of Social, Technological and Environmental Science*, v. 8, n. 3, p. 47-68, 2019.

SILVA, Washington Kennedy Araújo Sousa; TAGLIAFERRO, Evandro Roberto. Aterro sanitário-a engenharia na disposição final de resíduos sólidos. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 2, p. 12216-12236, 2021.

SNIS — Sistema Nacional de Informações em Saneamtno. Diagnóstico Temático Visão Geral: Resíduos Sólidos. 2023.

SOARES, Fabio Rubens. Produção de biogás a partir do aproveitamento energético dos resíduos orgânicos. *Energia e Biogás*. 2021.

SOUSA, Daniel Leal; LIRA, Marcos Antônio Tavares; DE MORAES, Albemerc Moura. PARCERIAS PÚBLICO-PRIVADAS (PPPs) NO AVANÇO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL. In: Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2024.

SOTOS, Mary et al. GHG Protocol: Scope 2 Guidance. Greenhouse Gas Protocol. 2015.

TALANOIA. A Política Nacional de Mudança do Clima em 2020: estado de metas, mercados e governança assumidos na Lei 12.187/2009. Rio de Janeiro, Brasil. 2020.

TRINDADE, Larissa de Lima; HEMING, Gabriela da Costa; DEIMLING, Moacir Francisco. Análise das práticas ambientais de indústrias moveleiras. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 15, n. 1, p. 221-236, 2022.

TSAI, D. et al. Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), 2023. Disponível em: <https://oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/11/Relatorio-SEEG_gases-estufa_2023FINAL.pdf>

VIEIRA, Cícero Fernandes A. et al. Efeitos climáticos do metano na atmosfera. Revista Tecnologia, v. 29, n. 1, 2008.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. WMO Global Annual to Decadal Climate Update 2024-2028. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://library.wmo.int/viewer/68910/download?file=WMO_GADCU_2024-2028_en.pdf&type=pdf&navigator=1>.

WU, Erxi et al. Study on Carbon Emission Characteristics and Emission Reduction Measures of Lime Production—A Case of Enterprise in the Yangtze River Basin. Sustainability, v. 15, n. 13, p. 10185, 2023.

YNOUE, Rita Yuri et al. Meteorologia: noções básicas. Oficina de Textos, 2017.

ZENG, Yilin; YUAN, Xiang; HOU, Bing. Analysis of Carbon Emission Reduction at the Port of Integrated Logistics: The Port of Shanghai Case Study. Sustainability, v. 15, n. 14, p. 10914, 2023.