

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS DE BLUMENAU – COORDENADORIA ESPECIAL DE ENGENHARIA  
DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ADRIELLE PALHOSA

**ANÁLISE DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO PROCESSO DE  
FUNDIÇÃO DE CARÇAÇAS DE MOTORES ELÉTRICOS DE FERRO FUNDIDO  
CINZENTO USANDO O MÉTODO *GHG PROTOCOL***

BLUMENAU

2021

ADRIELLE PALHOSA

**ANÁLISE DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO PROCESSO DE  
FUNDIÇÃO DE CARCAÇAS DE MOTORES ELÉTRICOS DE FERRO FUNDIDO  
CINZENTO USANDO O MÉTODO *GHG PROTOCOL***

Trabalho apresentado ao curso de graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina Campus Blumenau como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Luciana Maccarini Schabbach.

BLUMENAU

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Palhosa, Adrielle

ANÁLISE DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE CARÇAÇAS DE MOTORES ELÉTRICOS DE FERRO FUNDIDO CINZENTO USANDO O MÉTODO GHG PROTOCOL / Adrielle Palhosa ; orientador, Luciana Maccarini Schabbach, 2022.

112 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Engenharia de Materiais, Blumenau, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Gases de Efeito Estufa. 3. Fundição. 4. Greenhouse Gas Protocol. 5. Carcaças de Motores Elétricos. I. Maccarini Schabbach, Luciana. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. III. Título.

ADRIELLE PALHOSA

**ANÁLISE DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO PROCESSO  
DE FUNDIÇÃO DE CARÇAÇAS DE MOTORES ELÉTRICOS DE FERRO  
FUNDIDO CINZENTO USANDO O MÉTODO *GHG PROTOCOL***

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau.

Blumenau, 15 de março de 2021.



Documento assinado digitalmente  
Adrielle Palhosa  
Data: 16/03/2022 18:51:34-0300  
CPF: 100.104.669-24  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Adrielle Palhosa  
Acadêmico

**Banca Examinadora:**



Documento assinado digitalmente  
Luciana Maccarini Schabbach  
Data: 15/03/2022 15:45:29-0300  
CPF: 823.635.799-68  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

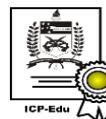
Profa. Dra. Luciana Maccarini Schabbach  
Orientadora/Presidente



Documento assinado digitalmente  
Joao Batista Rodrigues Neto  
Data: 16/03/2022 16:23:43-0300  
CPF: 645.810.989-04  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Dr. João Batista Rodrigues Neto  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente  
Marcio Roberto da Rocha  
Data: 15/03/2022 15:56:02-0300  
CPF: 996.290.389-00  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Dr. Marcio Roberto da Rocha  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais José Palhosa e Marisa Machado Palhosa, e ao Felipe Alfredo Nack que sempre me deram suporte e apoio durante esses anos de graduação, que são as pessoas mais especiais da minha vida.

A orientadora Prof. Dra. Luciana Maccarini Schabbach pelo suporte e incentivo para realização deste trabalho.

Ao colega Charles Belettini Hahn, que sempre foi sempre paciente e atencioso e me ajudou a desenvolver esse trabalho.

Ao meu amigo Henrique das Almas que foi uma pessoa essencial durante o processo de graduação.

A todo o corpo docente da UFSC que contribuíram com a minha graduação, fica aqui o meu muito obrigado.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Neste trabalho foi aplicada uma metodologia que permite quantificar a potencial redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) quando se faz uso de sucata metálica no processo de fundição de carcaças metálicas de motores. A metodologia do *Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol)* padrão internacional para a quantificação de emissões de GEE foi usada para os cálculos das emissões, fazendo a coleta de dados de uma indústria do ramo metal mecânica do estado de Santa Catarina. A principal métrica utilizada para contabilização de emissões de GEE é o Carbono Equivalente ( $\text{CO}_2\text{e}$ ), que é a soma da multiplicação dos GEE por seus respectivos potenciais de aquecimento global. Os dados de interesse são referentes apenas ao processo de fundição de carcaças metálicas da empresa e foram categorizados para aplicação nos devidos “Escopos” estabelecidos pela metodologia. Foram avaliados três distintos cenários para o cálculo das emissões geradas no processo de fundição de carcaças metálicas. O cenário 1 refere-se ao uso de 100% de sucata metálica, o cenário 2 refere-se ao uso de 100% de material metálico virgem e, por fim, o cenário 3 relacionado ao uso de 50% sucata metálica e 50% material metálico virgem. Os três cenários foram comparados com o intuito de determinar qual o impacto na redução da emissão de GEE causada pelo uso de sucatas no processo de fundição. Os resultados mostraram que usar apenas matéria-prima reciclada (cenário 1) implica numa redução de 73% nas emissões  $\text{CO}_2\text{e}$ , quando comparado com o uso de apenas material metálico virgem (cenário 2). Em específico, para o cenário 1, as emissões de  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2\text{O}$  apresentaram respectivamente redução de 73,3% e 75,6%. O cenário 3 apresentou uma redução de 36,6% nas emissões  $\text{CO}_2\text{e}$  quando comparado com o cenário 2. As principais categorias que contribuíram nas mudanças das emissões de GEE entre os cenários foram o transporte *upstream* (transporte do berço até a saída do produto pelo portão da empresa), bens e serviços adquiridos e o consumo de energia. Através dos dados coletados foi possível estimar uma média de emissão de  $\text{CO}_2\text{e}$  para cada carcaça de motor produzida, tendo para os cenários 1, 2 e 3 emissões de 0,042, 0,157 e 0,099  $\text{tCO}_2\text{e}/\text{unidade}$ , respectivamente. Esse estudo é precursor para indicar ao setor metal mecânico como quantificar as reduções das emissões de GEE ao utilizar sucata metálica no processo produtivo. Com a aplicação da metodologia *GHG Protocol* foi possível comprovar que o uso de sucatas no processo de fundição contribui significativamente para a redução de emissões de GEE. A aplicação dessa metodologia de cálculo de emissões pode potencializar a implementação da logística reversa no setor, promover o crescimento de empresas de reciclagem locais e contribuir para que toda cadeia produtiva envolvida atue de forma sinérgica no cumprimento das metas globais de redução de emissões de GEE.

Palavras-chave: Gases de Efeito Estufa, Fundição, Carcaças de Motores Elétricos, *Greenhouse Gas Protocol*.

## ABSTRACT

In this work, a methodology was applied to quantify the potential reduction of greenhouse gas (GHG) emissions when using scrap metal in the casting process of metal engine housings. The methodology of the Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol), an international standard for the quantification of GHG emissions was used to calculate the emissions, collecting data from a metalworking industry in the state of Santa Catarina. The main metric used to account for GHG emissions is the Carbon Equivalent (CO<sub>2e</sub>), which is the sum of the multiplication of GHGs by their respective global warming potentials. The data of interest refer only to the company's metal casting process and were categorized for application in the appropriate "Scopes" established by the methodology. Three different scenarios were evaluated for the calculation of emissions generated in the casting process of metallic casings. Scenario 1 refers to the use of 100% metallic scrap, scenario 2 refers to the use of 100% virgin metallic material and, finally, scenario 3 related to the use of 50% metallic scrap and 50% virgin metallic. The three scenarios were compared in order to determine the impact on the reduction of GHG emissions caused by the use of scrap in the smelting process. The results showed that using only recycled raw material (scenario 1) implies a 73% reduction in CO<sub>2e</sub> emissions, when compared to using only virgin metallic material (scenario 2). Specifically, for scenario 1, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions showed a reduction of 73.3% and 75.6%, respectively. Scenario 3 showed a 36.6% reduction in CO<sub>2e</sub> emissions when compared to scenario 2. The main categories that contributed to the changes in GHG emissions between the scenarios were upstream transport (transport from the berth to the exit of the product through the gate company), goods and services purchased and energy consumption. Through the collected data, it was possible to estimate an average CO<sub>2e</sub> emission for each engine frame produced, having for scenarios 1, 2 and 3 emissions of 0.042, 0.157 and 0.099 tCO<sub>2e</sub>/unit, respectively. This study is a precursor to indicating to the metalworking sector how to quantify the reductions in GHG emissions when using metallic scrap in the production process. With the application of the GHG Protocol methodology, it was possible to prove that the use of scrap in the smelting process contributes significantly to the reduction of GHG emissions. The application of this emission calculation methodology can enhance the implementation of reverse logistics in the sector, promote the growth of local recycling companies and help the entire production chain involved to act synergistically in meeting global targets for reducing GHG emissions.

Keywords: Greenhouse Gases, Foundry, Electric Motor Housings, Greenhouse Gas Protocol.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das etapas consideradas em um estudo de ACV. ....	20
Figura 2 - Fases de uma análise ACV. ....	21
Figura 3 - O balanço energético médio global do sistema Terra-atmosfera.....	23
Figura 4 - Linha do tempo das principais ações para regulamentação da quantificação de GEE. ....	28
Figura 5 - Limites organizacionais e operacionais de uma empresa .....	33
Figura 6 - Visão geral dos escopos e emissões do GHG Protocol em toda a cadeia de valor.....	34
Figura 7 - Selos de Ouro, Prata e Bronze usados no pelo GHG Protocol Brasil.....	35
Figura 8 - Emissões dos Escopos 1, 2 e 3 do GHG Protocol dos cinco setores (energia, transporte, indústria, Construção Civil e Agricultura) do IPCC durante o período de 1995-2015. ....	44
Figura 9 - Emissões dos Escopos 1, 2 e 3 de países da OCDE e não membros da OCDE, e dos países China, Alemanha, Brasil e Estados Unidos.....	45
Figura 10 - Ciclo “cradle-to-grave” de uma fundição. ....	48
Figura 11 - Constituintes externos do motor elétrico. ....	50
Figura 12 - Carcaça do motor elétrico trifásico. ....	51
Figura 13 - Diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono.....	53
Figura 14 - Microestrutura típica de um ferro fundido cinzento, com destaque para os flocos escuros de grafita. ....	54
Figura 15 - Relação entre composição, velocidade de resfriamento e microestrutura de ferros fundidos, onde P é Perlita; Gf é grafita em flocos e Gn é grafita em nódulos. ....	55
Figura 16 - Sucata metálica (aço e ferro fundido) após o processo de trituração.....	56
Figura 17 - Representação da sequência de operações na fundição em areia compactada em caixa.....	58
Figura 18 - Processo de vazamento do metal. ....	59
Figura 19 - (a) Desmoldagem da carcaça, (b) Carcaças com incrustações de areia após a desmoldagem, (c) Carcaças após o processo de jateamento de areia e rebarbação manual. ....	60
Figura 20 - Consumo de matéria-prima/mês para os cenários 1, 2 e 3.....	71
Figura 21 - Consumo de água para o tratamento de efluentes para os cenários 1, 2 e 3.	74

Figura 22 - Emissões de GEE geradas pela combustão do GLP para empilhadeiras para os cenários 1, 2 e 3. ....	79
Figura 23 - Consumo de energia elétrica para os cenários 1, 2 e 3. ....	81
Figura 24 - Emissões de carbono equivalente (CO <sub>2e</sub> ) mensal geradas pelo consumo de energia do cenário 1, 2 e 3. ....	83
Figura 25 - Consumo de energia anual de cada cenário. ....	84
Figura 26 - Emissões de carbono equivalente (CO <sub>2e</sub> ) anual referente ao consumo de energia de cada cenário. ....	84
Figura 27 - Emissões de carbono equivalente (CO <sub>2e</sub> ) mensal relacionadas ao consumo de matéria-prima. ....	86
Figura 28 - Emissões de carbono equivalente (CO <sub>2e</sub> ), carbono biogênico (CO <sub>2</sub> biogênico) e gases do efeito estufa CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O geradas pelo transporte de matéria-prima. ....	89
Figura 29 - Emissões de GEE oriundas no tratamento dos efluentes do gerados nos cenários 1, 2 e 3. ....	90
Figura 30 - Quantidade mensal dos diversos tipos de resíduos de areia de fundição que são destinados para aterro sanitário industrial. ....	91
Figura 31 - Quantidade mensal de escória gerada no processo de fundição destinada para o aterro sanitário industrial. ....	92
Figura 32 - Estimativa do número de colaboradores por tipo de locomoção na seção de fundição. ....	94
Figura 33 - Emissões de carbono equivalente (CO <sub>2e</sub> ), CO <sub>2</sub> biogênico e dos gases CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O geradas pelo deslocamento casa-trabalho dos funcionários da seção de fundição ....	95
Figura 34 - Total de peças produzidas em quilograma (kg) por mês. ....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias de emissões de GEE que compõem o Escopo 1 do GHG Protocol Brasil.....	37
Tabela 2 - Categorias de emissões de GEE que compõem o Escopo 3 do GHG Protocol. ....	42
Tabela 3 - Principais aspectos e impactos gerados no processo de fundição.....	47
Tabela 4 - Cenários da composição de carcaças de motores elétricos avaliados. ....	62
Tabela 5 - Valores do GWP para os principais gases de efeito estufa. ....	63
Tabela 6 - Fator de emissão (fc) para combustão do GLP. ....	64
Tabela 7 - Fatores médios mensais de CO <sub>2</sub> da produção de energia no Brasil. ....	69
Tabela 8 - Fator de emissão dos combustíveis para caminhões de porte médio a diesel no ano de 2020.....	73
Tabela 9 - Fator de emissão para o tratamento de efluentes.....	74
Tabela 10 - Fator médio de emissão para o tratamento de resíduos sólidos no Brasil... 75	
Tabela 11 - Fator de emissão (por passageiro) para frota de ônibus urbano em 2020 por gases CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O. ....	76
Tabela 12 - Fator de emissão dos combustíveis gasolina e etanol para o ano de 2020.. 77	
Tabela 13 - Emissões de CO <sub>2</sub> e carbono equivalente (CO <sub>2</sub> e) fugitivas geradas pelos extintores de incêndio de CO <sub>2</sub> para ambos os cenários. ....	80
Tabela 14 - Dados de transporte dos materiais: ferro fundido virgem e sucata. ....	88
Tabela 15 - Emissões de GEE geradas pelo tratamento de resíduos sólidos para o cenário 1, 2 e 3. ....	90
Tabela 16 - Número de colaboradores da seção de fundição de carcaças. ....	92
Tabela 17 - Distribuição por tipo de transporte do Parque Fabril. ....	93
Tabela 18 - Emissões totais de GEE por categoria do cenário 1.....	96
Tabela 19 - Emissões totais de GEE por categoria do cenário 2. ....	96
Tabela 20 - Emissões totais de GEE por categoria do cenário 3.....	98
Tabela 21 - Emissões totais de GEE dos cenários 1, 2 e 3.....	99

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CE	Carbono Equivalente
CEBDS	Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
CFCs	Clorofluorcarbonos
CO <sub>2</sub> b	Dióxido de Carbono Biogênico
CO <sub>2</sub> e	Equivalência em Dióxido de Carbono ou Carbono Equivalente
COP	Conferências das Partes
DEFRA	<i>Department for Environment, Food &amp; Rural Affairs</i>
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
FC	Ferro fundido cinzento
Fe <sub>α</sub>	Ferrita
FGV	Fundação Getúlio Vargas
FoFo	Ferro fundido
GEE	Gases de Efeito Estufa
Gf	Grafita em flocos
<i>GHG Protocol</i>	<i>Greenhouse Gas Protocol</i>
<i>GHG Protocol</i> Brasil	Programa Brasileiro do <i>GHG Protocol</i>
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
Gn	Grafita em nódulos
GVces	Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas

GWP	Potencial de Aquecimento Global
HFC	Hidrofluorcarbono
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudança do Clima
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCA	<i>Life-cycle Assessment</i>
MBRE	Mercado Brasileiro de Redução de Emissões
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Normas Brasileiras
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento
OECD	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OMN	Organização Meteorológica Mundial
ONU Meio Ambiente	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PFC	Perfluorcarbonos
SBTi	<i>Science Based Targets initiative</i>
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
USEPA	<i>US Environmental Protection Agency</i>
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
WRI	<i>World Resources Institute</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVO</b> .....	<b>18</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	18
<b>2.1.1 Objetivos Específicos</b> .....	<b>18</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
3.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA .....	19
3.2 EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA .....	22
<b>3.2.1 Principais Gases do Efeito Estufa e fontes de emissão</b> .....	<b>25</b>
3.3 AÇÕES PARA QUANTIFICAÇÃO DE GEE NO MUNDO .....	27
3.4 GREENHOUSE GAS PROTOCOL ( <i>GHG PROTOCOL</i> ) .....	32
<b>3.4.1 Escopo 1 – Emissões de diretas geradas nas operações da organização.</b>	<b>37</b>
<b>3.4.2 Escopo 2 – Emissões indiretas geradas da compra de energia</b> .....	<b>39</b>
<b>3.4.3 Escopo 3 - Emissões indiretas de fontes não pertencentes a organização</b>	
.....	<b>40</b>
3.4.3.1 Importância da quantificação das emissões de GEE do Escopo 3 .....	43
3.5 PROCESSO DE FUNDIÇÃO E EMISSÕES RELACIONADAS .....	46
3.6 MOTORES ELÉTRICOS .....	49
<b>3.6.1 Carcaças de motores elétricos</b> .....	<b>51</b>
3.7 FERRO FUNDIDO .....	52
<b>3.7.1 Ferro Fundido Cinzento</b> .....	<b>53</b>
3.8 FUNDIÇÃO DE CARCAÇAS DE MOTORES ELÉTRICOS .....	55
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>61</b>
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	61
<b>4.1.1 Metodologia de cálculo para o Escopo 1</b> .....	<b>63</b>
4.1.1.1 Combustão móvel .....	64
4.1.1.2 Processos industriais .....	65
4.1.1.3 Emissões fugitivas .....	66
<b>4.1.2 Metodologia de cálculo para o Escopo 2</b> .....	<b>67</b>
<b>4.1.3 Metodologia de cálculo para o Escopo 3</b> .....	<b>69</b>

4.1.3.1 Bens e serviços adquiridos .....	70
4.1.3.2 Transporte e Distribuição <i>Upstream</i> (do berço ao portão) .....	71
4.1.3.3 Resíduos e efluentes gerados nas operações.....	73
4.1.3.4 Deslocamento dos funcionários.....	75
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>79</b>
5.1 ANÁLISES DAS EMISSÕES DE GEE GERADAS NO ESCOPO 1 .....	79
<b>5.1.1 Emissões de GEE na combustão móvel .....</b>	<b>79</b>
<b>5.1.2 Emissões fugitivas .....</b>	<b>80</b>
<b>5.1.3 Emissões de processos industriais .....</b>	<b>80</b>
5.2 EMISSÕES DE GEE GERADAS NO ESCOPO 2 .....	81
<b>5.2.1 Avaliação do consumo de energia do processo de fundição .....</b>	<b>81</b>
<b>5.2.2 Emissões geradas pelo consumo de energia no processo de fundição.....</b>	<b>83</b>
5.3 EMISSÕES DE GEE GERADAS NO ESCOPO 3 .....	85
<b>5.3.1 Emissões geradas pelos bens e serviços adquiridos .....</b>	<b>85</b>
<b>5.3.2 Emissões geradas pelo transporte e distribuição <i>upstream</i> (do berço ao portão) .....</b>	<b>87</b>
<b>5.3.3 Emissões dos resíduos gerados nas operações.....</b>	<b>89</b>
<b>5.3.4 Emissões geradas pelo deslocamento dos funcionários.....</b>	<b>92</b>
5.4 EMISSÕES DE TOTAIS GEE .....	95
5.5 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO MÉTODO .....	101
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>103</b>
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	104
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>105</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um fenômeno ocasionado pela concentração de gases (como dióxido de carbono, óxido nitroso, metano e os clorofluorcarbonos – chamados gases de efeito estufa-) na atmosfera, formando uma camada que permite a passagem dos raios solares e que absorve grande parte do calor emitido pela superfície da Terra não permitindo a saída desse calor da atmosfera. Os gases de efeito estufa agem como isolantes por absorver uma parte da energia irradiada pela Terra (AMBIENTE, 2021).

O aquecimento global é um dos principais assuntos em pauta hoje nas discussões mundiais. A preocupação com os Gases de Efeito Estufa (GEE) tem sido uma temática bastante difundida entre as comunidades científicas em relação aos impactos causados ao meio ambiente ao longo dos anos. As políticas públicas, cada vez mais, estreitam suas ações para mitigação dos danos que o homem provoca ao planeta, desenvolvendo mecanismos de controle e monitoramento (CASTRO; PEREIRA; FREITAS, 2018).

A emissão de gases causadores do efeito estufa na atmosfera tem aumentado com o desenvolvimento industrial, e com isso, há uma necessidade de encontrar formas de reduzir essas emissões. O conceito de redução de emissões foi consagrado pela Conferência de Quioto, em 1997, onde entrou em vigor o Protocolo de Quioto com a finalidade de limitar e reverter as emissões de gases causadores do efeito estufa e também estabelecer uma proposta de desenvolvimento para a sustentabilidade dos recursos naturais (OLIVEIRA, 2017).

Periodicamente ocorrem encontros mundiais que tem como principal objetivo traçar metas para o combate ao aquecimento global. Até o momento o último encontro realizado foi a Conferência das Partes (COP) 26 que ocorreu em Glasgow, onde todos os países participantes, inclusive o Brasil, concordaram com o pacto climático de Glasgow, que visa conter o aumento de temperatura em 1,5°C, para isso sendo necessário estabelecer ações para a redução das emissões de GEE.

Através dessa preocupação surgem diversas metodologias para quantificar o impacto ambiental de um produto ou processo, como a avaliação do ciclo de vida (ACV) relacionada à norma ISO 14040, que analisa todos os impactos gerados dentro do ciclo de vida de um produto de forma complexa e consistente. Em específico, no que se refere a análise de emissões de GEE há atualmente metodologias específicas, como a *Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol)* que permite uma análise mais simples quando

comparadas com à ACV, mas eficaz quando se deseja quantificar as emissões de GEE. Essa metodologia permite mapear os principais causadores dessas emissões e delinear métodos de redução.

Em 2008, após a criação do *GHG Protocol* e da norma ISO 14064 (relacionada a quantificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de GEE) e houve a proposta de adaptação dos métodos de quantificação de emissões de GEE internacionais para a realidade brasileira através do Programa Brasileiro *GHG Protocol*. Nesse programa são apresentadas as principais fontes de emissão de GEE do Brasil e fatores adaptados aos cenários brasileiros. Além disso, o *GHG Protocol* Brasil faz divulgação pública das emissões de GEE de instituições públicas e privadas que utilizam o seu método. Os inventários de emissões de gases de efeito estufa (GEE) são uma ferramenta importante no diagnóstico dos efeitos do meio urbano no meio ambiente e ponto de partida para proposição de estratégias de mitigação de mudanças climáticas (SENA, MARINS, 2021).

Conhecendo o perfil de emissões de GEE a partir do diagnóstico do próprio inventário, qualquer organização pode estabelecer planos e metas para redução e gestão das emissões de gases de efeito estufa, engajando-se na solução desse enorme desafio que atinge o planeta. As empresas, por sua vez, começam a desenvolver um olhar para a questão, não visando apenas à melhoria de qualidade de vida e sustentação das estruturas biológicas, mas também como forma de garantir seus negócios de forma estratégica (CASTRO; PEREIRA; FREITAS, 2018). Diversas empresas globais como Schneider Electric, ABB e Siemens começaram a mapear as emissões geradas em seus processos com as metodologias do *GHG Protocol*.

Uma das maneiras mais acessíveis de realizar o desenvolvimento sustentável e ao mesmo tempo a redução de emissões é com o uso de conceitos de a aplicação da economia circular, como a prática da logística reversa, que proporciona a inserção de materiais pós-consumo no processo produtivo. Neste trabalho serão quantificadas as emissões de GEE resultantes da prática da logística reversa relacionada ao uso de sucata metálica no processo fundição de carcaças de ferro fundido cinzento aplicando o método *GHG Protocol*. Como a análise ACV completa de um produto pode ser relativamente complexa e demandar longo tempo de análise, às vezes dificultando sua execução pelas organizações, a metodologia escolhida neste trabalho é o *GHG Protocol* que é mais simples e de mais fácil realização para organizações, embora avalie o ciclo de vida do produto somente do ponto de vista de emissões de GEE.

Nesse contexto, esse estudo pode servir como ponto de partida para que empresas do ramo metal mecânico possam quantificar as reduções de emissões de GEE quando usam sucata em seus processos produtivos, proporcionando incentivo à reciclagem de resíduos metálicos e potencializando a implantação a logística reversa, desta forma, contribuindo para uma cadeia produtiva mais sustentável.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo do presente trabalho é usar o método *GHG Protocol* para quantificar as emissões de gases de efeito estufa no processo de fundição de carcaças de ferro fundido cinzento quando se adiciona sucata metálica.

#### **2.1.1 Objetivos Específicos**

- Quantificar as emissões geradas pelo processo de fundição de carcaças de motores elétricos em três distintos cenários: uso de 100% de sucata metálica, uso de 50% sucata metálica e 50% material metálico virgem e, por fim, uso 100% material metálico virgem;
- Comparar e avaliar as emissões de gases do efeito estufa (GEE) na fabricação de carcaças de motores elétricos de ferro fundido com sucata e material metálico virgem;
- Destacar a importância da logística reversa e dos processos de reciclagem de sucata metálica na busca pela redução da extração de recursos naturais e GEE;
- Mostrar a importância da quantificação de GEE para identificar pontos críticos do processo e estabelecer as ações necessárias para redução de emissões no processo de fundição;
- Incentivar o surgimento de novos projetos que empreguem a reciclagem tanto na empresa avaliada como na sua rede de atuação.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De forma geral existem diversos conceitos que se preocupam com a avaliação dos impactos ambientais, inclusive as emissões de GEE, dos quais se destacam: desenvolvimento sustentável, economia circular, gestão e valorização de resíduos e logística reversa. Esses conceitos se usam de mecanismos para efetuar essas avaliações, e normalmente cada mecanismo faz um tipo de avaliação. É comum que mecanismos como a Análise do Ciclo de Vida e o *Greenhouse Gas Protocol* sejam empregados nesse tipo de situação.

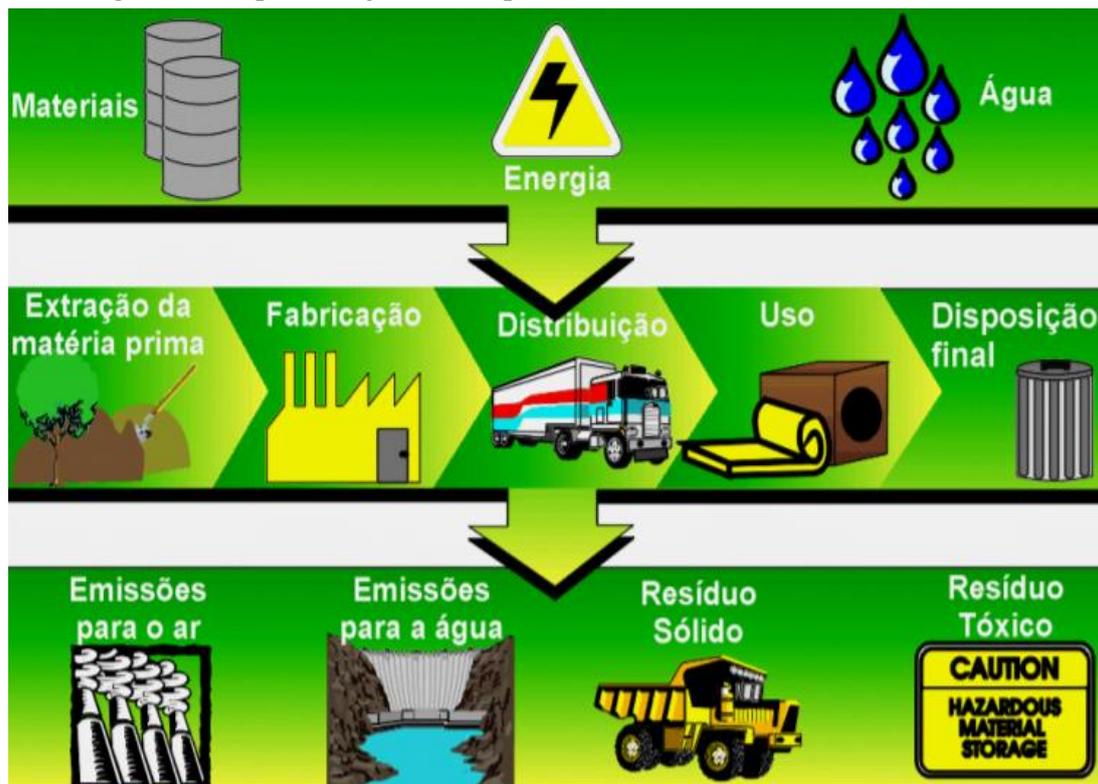
Existem diversos movimentos ao redor do mundo, cujo principal objetivo é minimizar os impactos climáticos gerados pelas emissões de gases de efeito estufa. Esses movimentos acontecem periodicamente e tem como objetivo determinar metas para os países participantes. Tanto os mecanismos quanto os movimentos citados são discutidos detalhadamente no decorrer deste capítulo.

#### 3.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Antes mesmo dos conceitos e métodos de quantificação de emissões de GEE em processos e produtos, já existiam os conceitos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ou em inglês *Life-cycle Assessment* (LCA). A ACV avalia os aspectos ambientais e os impactos potenciais associados ao ciclo de vida de um produto, ou seja, desde a extração dos recursos naturais até o uso e a disposição final do produto, como apresentado na Figura 1.

O conceito de ACV emergiu na década de 1960 e desde a década de 1970 vários esforços para desenvolver uma metodologia acerca deste conceito vêm sendo adotados. A partir de 1990 a SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) e a USEPA (*US Environmental Protection Agency*) propuseram *workshops* e diversos projetos para desenvolver e promover um *framework* visando à condução da Análise de Inventário do Ciclo de Vida e Avaliação de Impacto. Esforços similares foram empreendidos pelo SETAC Europa, por organizações internacionais de padronização de normas (tais como a *International Organization for Standardization - ISO*) e praticantes de pesquisas com esta abordagem em todo o mundo (CLAUDINO; TALAMINI, 2012).

Figura 1 - Representação das etapas consideradas em um estudo de ACV.



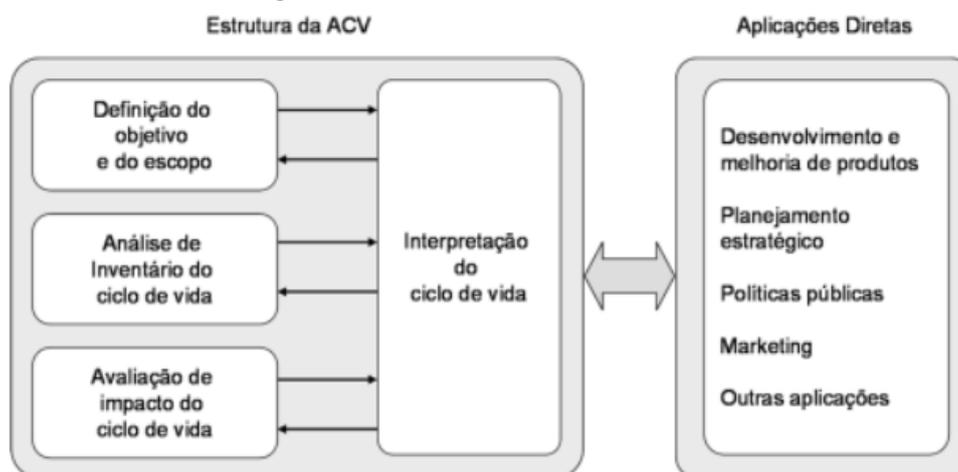
Fonte: Coltro, 2007.

Segundo a Norma ABNT NBR ISO 14040 (2009), que regulamenta a metodologia para a realização da ACV, esta é composta por quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos ambientais e interpretação (Figura 2). Na primeira fase, definição do objetivo e escopo, o propósito do estudo e sua amplitude são definidos, envolvendo decisões importantes sobre as fronteiras e a unidade funcional. Na fase de Análise de Inventário, informações sobre o sistema do produto são levantadas e as entradas e as saídas consideradas relevantes para o sistema são quantificadas. Na fase de Avaliação de Impacto, os dados e as informações gerados da Análise de Inventário são associados a impactos ambientais específicos, de modo que o significado destes impactos potenciais possa ser avaliado. E, na fase de Interpretação, os resultados obtidos nas fases de Análise de Inventário e de Avaliação de Impacto são combinados e interpretados de acordo com os objetivos definidos previamente no estudo (COLTRO, 2007).

No âmbito da ACV é comum encontrar três termos: “*cradle-to-gate*” (do berço ao portão), “*cradle-to-grave*” (do berço ao túmulo) e “*cradle-to-cradle*” (do berço ao berço). Em suma, a análise “*cradle-to-gate*” é aquela que se preocupa com o processo que

abrange desde o nascimento dos elementos que compõem um produto até sua saída da empresa (portão). Já o conceito de “*cradle-to-grave*” tem o diferencial de se preocupar com o produto até o fim da sua vida, após o uso dos consumidores finais (túmulo). Por fim, o conceito de “*cradle-to-cradle*” é basicamente o conceito de uma economia circular, onde um produto em fim de uso é reciclado e utilizado como matéria-prima para novos produtos.

Figura 2 - Fases de uma análise ACV.



Fonte: ABNT, 2001.

A ACV pode ser conceituada como ferramenta para avaliar os efeitos ambientais de um produto, processo ou atividade ao longo do seu ciclo de vida ou duração, conhecido como análise “*cradle to gate*” (CLAUDINO; TALAMINI, 2012). Desta forma, a ACV se assemelha às outras metodologias apresentadas neste documento, contudo, demonstra maior complexidade e maior custo de implementação para a análise de ciclo de vida dos produtos.

Tanto a ideia de “*cradle to gate*” quanto a ideia de “*cradle to grave*” reforçam, de alguma forma, o conceito de economia linear, isto é, um modelo econômico onde a cadeia produtiva apenas extrai recurso e produz bens, descartando as sobras como rejeito. Nesse sentido, surge a ideia de realizar o modelo econômico circular, que reaproveita os rejeitos do fim da cadeia. Stahel *apud* Bjørn (2018) argumenta que a solução realmente sustentável era usar bens duráveis em um ciclo fechado do “berço de volta ao berço” em uma economia circular (STAHHEL, 2013 *apud* BJØRN, 2018). A Economia Circular é uma abordagem estratégica e operacional que assenta na redução, reutilização,

recuperação e reciclagem de materiais e energia potencializando o valor e consequentemente, o tempo de vida útil dos produtos, materiais e recursos na economia (AZEVEDO; PRAÇA, 2018).

Como visto a ACV avalia diversos impactos gerados na produção de bens e serviços, dos quais destacam-se: toxicidade, emissões atmosféricas, uso de energia e água, etc. Em particular, quando tratamos de impactos gerados pelas emissões atmosféricas, falamos principalmente do potencial de deterioração da camada de ozônio e potencial de aquecimento global gerados pelos gases.

A emissão de gases causadores do efeito estufa na atmosfera tem aumentado, o desenvolvimento trouxe a poluição, e com isso há uma necessidade de encontrar formas de reduzir essas emissões (OLIVEIRA, 2017). Dado esse aumento de emissão de gases surge a necessidade da definição dos gases do efeito estufa (GEE) e metodologias para quantificá-las, que será detalhado na sequência.

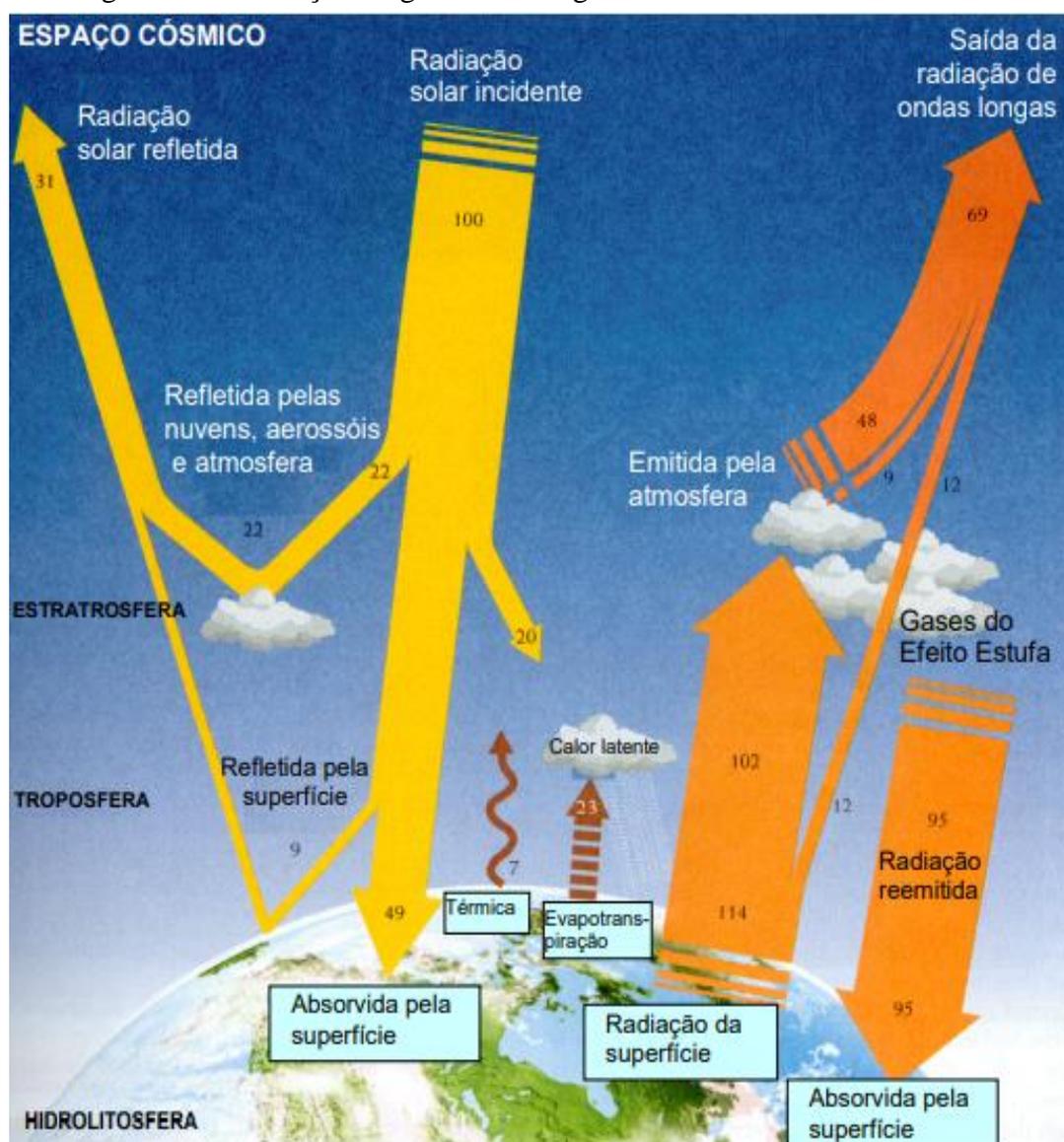
### 3.2 EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA

A intensificação das atividades antropogênicas (processos não naturais gerados pela atividade humana), a partir da revolução industrial, proporcionou o aumento da emissão de determinados gases para a atmosfera, que interagem a nível molecular com a radiação térmica emitida para a Terra. A este fenômeno foi dado o nome de Aquecimento Global. Mais tarde, devido à similaridade do processo que acontece com a atmosfera do planeta Terra e das estufas construídas pelo homem no cultivo de plantas e alimentos, este fenômeno foi chamado de efeito estufa, embora os processos físicos não sejam exatamente iguais nos dois casos (SANTOS, 2000).

O efeito estufa é um fenômeno natural importante que ocorre no planeta Terra e possibilita a manutenção da temperatura global, num ponto de equilíbrio para garantir a vida terrestre tal como conhecemos. Entretanto, quando por ações antrópicas ocorre aumento da emissão de gases na atmosfera que proporcionam esse efeito estufa de maneira descontrolada, especialmente pela queima de combustíveis fósseis e desmatamento, há formação de uma camada de poluentes que funciona como um isolante térmico retendo a temperatura, intensificando o efeito estufa e provocando o aquecimento global no planeta (OLIVEIRA, 2015).

O efeito estufa do planeta é consequência do balanço da energia emitida pelo Sol que é absorvida pela Terra e da energia que é refletida de volta para o espaço. O forçamento radiativo é um balanço entre a radiação solar incidente do Sol e a radiação infravermelha que sai do planeta. Sem nenhum forçamento radiativo, a radiação solar incidente que entra na Terra permaneceria aproximadamente igual à radiação infravermelha emitida pelo planeta. A adição de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera aprisiona uma fração da radiação infravermelha, irradiando esta energia de volta para a Terra e, desse modo, promovendo o aquecimento do planeta (MATTOS, 2001). O balanço de energia e radiação é apresentado na Figura 3.

Figura 3 - O balanço energético médio global do sistema Terra-atmosfera.



Fonte: Graedel & Crutzen, 1997 *apud* Mattos, 2001.

A mudança global do clima vem se manifestando de diversas formas, destacando-se o aquecimento global, a maior frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, alterações nos regimes de chuvas, perturbações nas correntes marinhas, retração de geleiras e a elevação do nível dos oceanos. Desde a Revolução Industrial a temperatura média do planeta aumentou cerca de 0,6 °C e recentemente o fenômeno tem se acelerado: as maiores temperaturas médias anuais do planeta foram registradas nos últimos anos do século XX e nos primeiros anos do século XXI (NAE, 2005).

A última década apresentou os três anos mais quentes dos últimos 1000 anos da história recente da Terra. Hoje, através das análises sistemáticas do Painel Intergovernamental de Mudança do Clima (IPCC), sintetizando o conhecimento científico existente sobre o sistema climático e como este responde ao aumento das emissões antropogênicas de gases do efeito estufa (GEE) e de aerossóis, há um razoável consenso de que o aquecimento global observado nos últimos 100 anos é causado pelas emissões acumuladas de GEE, principalmente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oriundo da queima de combustíveis fósseis – carvão mineral, petróleo e gás natural – desde a Revolução Industrial e, em menor escala, do desmatamento da cobertura vegetal do planeta, e o metano (CH<sub>4</sub>), e não por eventual variabilidade natural do clima (NAE, 2005).

O IPCC, foi criado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (ONU Meio Ambiente) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) em 1988 com o objetivo de fornecer aos formuladores de políticas avaliações científicas regulares sobre a mudança do clima, suas implicações e possíveis riscos futuros, bem como para propor opções de adaptação e mitigação. Atualmente, o IPCC possui 195 países membros, incluindo o Brasil. Por meio de suas avaliações, o IPCC determina o estado do conhecimento sobre a mudança do clima, identifica onde há consenso na comunidade científica, e em que áreas mais pesquisas são necessárias. Os relatórios resultantes da avaliação do IPCC devem ser neutros, relevantes para a política, e não devem ser prescritivos. Além disso, as avaliações constituem insumos fundamentais para as negociações internacionais que visam o enfrentamento da mudança do clima (MCTIC, 2022).

### 3.2.1 Principais Gases do Efeito Estufa e fontes de emissão

A atmosfera terrestre é composta basicamente por dois gases, o Oxigênio ( $O_2$ ) e o Nitrogênio ( $N_2$ ), que somados atingem cerca de 99% do seu volume total. Em segundo plano, com cerca de 0.9%, está o Argônio (Ar). Os restantes 0.1% estão distribuídos dentre os demais gases, inclusive os causadores do efeito estufa, na concentração de traços. Esses gases, que ocorrem na atmosfera como traços, têm um alto potencial de interação com outros elementos químicos e com a radiação infravermelha (SANTOS, 2000). Os GEE podem ser divididos em dois grupos:

- Origem natural: provenientes de explosões vulcânicas, processos de respiração celular dos organismos vivos, etc.;
- Origem antropogênica: provenientes das atividades industriais, de produção de produtos e serviços, uso de energia, atividades agropecuárias, etc.;

Os principais gases antropogênicos causadores do fenômeno do aquecimento global são os seguintes (SANTOS, 2000):

- Dióxido de Carbono ( $CO_2$ );
- Metano ( $CH_4$ );
- Clorofluorcarbonos (CFCs);
- Óxido Nitroso ( $N_2O$ );

Abaixo tem-se a descrição de cada gás que contribui para o aumento do efeito estufa citados e suas fontes antropogênicas.

- $CO_2$ : Responsável por cerca de 60% do efeito estufa, cuja permanência na atmosfera é de pelo menos uma centena de anos, o dióxido de carbono é proveniente da queima de combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo, gás natural, turfa), queimadas e desmatamentos, que destroem reservatórios naturais e sumidouros, que tem a propriedade de absorver o  $CO_2$  do ar (CETESB, 2021).
- $CH_4$ : Responsável por 15 a 20% do efeito estufa, é componente primário do gás natural, também produzido por bactérias no aparelho digestivo do gado, biogás em aterros sanitários, mineração e queima de biomassa (CETESB, 2021).

- $N_2O$ : Participando com cerca de 6% do efeito estufa, o óxido nitroso é liberado por microrganismos no solo (por um processo denominado nitrificação, que libera igualmente nitrogênio -  $N_2$ ). A concentração deste gás teve um enorme aumento devido ao uso de fertilizantes químicos, à queima de biomassa, ao desmatamento e às emissões de combustíveis fósseis (CETESB, 2021).
- CFCs: Responsáveis por até 20% do efeito estufa, os clorofluorcarbonos são utilizados em geladeiras, aparelhos de ar condicionado, isolamento térmico e espumas, como propelentes de aerossóis, além de outros usos comerciais e industriais. Como se sabe, esses gases reagem com o ozônio na estratosfera, decompondo-o e reduzindo, assim, a camada de ozônio que protege a vida na Terra dos nocivos raios ultravioletas. Estudos recentes sugerem que, as propriedades de reter calor, próprias do CFCs, podem estar sendo compensadas pelo resfriamento estratosférico resultante do seu papel na destruição do ozônio (CETESB, 2021).

Para facilitar a comparação de emissões geradas, pode-se usar uma medida chamada de equivalência em dióxido de carbono ou carbono equivalente ( $CO_2e$ ). Essa é uma medida internacionalmente aceita que expressa a quantidade de GEE em termos equivalentes da quantidade de dióxido de carbono ( $CO_2$ ). O  $CO_2e$  é uma medida usada para comparar as emissões de vários gases de efeito estufa com base em seu potencial de aquecimento global (GWP), convertendo quantidades de outros gases para a quantidade equivalente de dióxido de carbono com o mesmo potencial de aquecimento global (SOILCARE PROJECT, 2022). Basicamente o  $CO_2e$  é a multiplicação das emissões pelo seu valor de GWP, quando maior o GWP maior é a sua contribuição para provocar o efeito estufa.

Uma proporção significativa das emissões de  $CO_2$  provém da queima de biomassa (material biológico feito de carbono, hidrogênio e oxigênio), especialmente nas atividades produtivas relacionadas ao setor agrícola. A queima de biomassa resulta em emissões consideradas neutras em termos de impacto climático, pois este  $CO_2$  é gerado através de um ciclo biológico e não fóssil. Nos termos do atual Protocolo de Quioto, o uso de biomassa e de seus subprodutos como combustíveis alternativos é considerado uma importante contribuição para a redução nas emissões de GEE (WRI BRASIL, 2015). Esse tipo de emissão é chamado de  $CO_2$  biogênico ( $CO_2b$ ), é não é usado para calcular as

emissões GEE relacionadas ao CO<sub>2</sub>e, normalmente ele é expresso separadamente nos relatórios de emissões de GEE.

Uma forma de compensar essas emissões CO<sub>2</sub> geradas seria através da compra de créditos de carbono. O crédito de carbono é um certificado eletrônico que é emitido quando há diminuição de emissão de gases que provocam o efeito estufa, gerador de aquecimento global. Um crédito de carbono equivale a uma tonelada de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) que deixou de ser emitido para a atmosfera (MENEGUIN, 2012).

Os créditos de carbono surgiram nos países desenvolvidos como meio de inibir a produção de poluentes. A legislação local estabeleceu níveis máximos de emissões de certos gases e, aqueles que conseguissem manter o volume de emissões abaixo do estabelecido, tinham direito a títulos de créditos equivalentes à porção reduzida, os quais podiam ser vendidos àqueles que não tiveram o mesmo sucesso, evitando que estes infringiam as regras (RIBEIRO, 2005).

No Brasil, a Comissão de Desenvolvimento Econômico, Indústria, Comércio e Serviços da Câmara dos Deputados aprovou o Projeto de Lei 528/21, que institui o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE). A ideia é regulamentar a compra e venda de créditos de carbono no País. Os créditos de carbono estarão atrelados a todos os projetos de redução ou remoção de GEE da atmosfera, como um projeto de reflorestamento, projeto solar e eólico, substituição de combustíveis fósseis, por exemplo. Essa redução será quantificada (em toneladas de gases) e convertida em títulos negociáveis no mercado, conforme regras previstas nesse projeto de Lei. (MACHADO, 2021).

### 3.3 AÇÕES PARA QUANTIFICAÇÃO DE GEE NO MUNDO

As emissões de GEE se tornaram um tópico de interesse global, demonstrando com o tempo que essas emissões causam o efeito estufa e, conseqüentemente, o aumento da temperatura da Terra. Notou-se que seria necessário realizar procedimentos a respeito. Os procedimentos adotados foram uma série de atividades como o Protocolo de Quioto (1997), criação de metodologias de cálculo do *Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol)* (2001) e, Programa Brasileiro do *GHG Protocol (GHG Protocol Brasil)* (2008) e algumas Conferências das Partes (COP) que visam regular e incentivar a redução das emissões de GEE a nível mundial apresentadas na Figura 4.

Para tratar do problema do efeito estufa e suas possíveis consequências sobre a humanidade, estabeleceu-se, em 1992, durante a Rio 92, a *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC). Adotada em 1992, a Convenção do Clima tem como meta propor ações para os países participantes, para que estes possam estabilizar as concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa (GEE) de forma a impedir que atividades antrópicas levem a uma “interferência perigosa” no clima do planeta. A Convenção do Clima entrou em vigor em 21 de março de 1994 e conta atualmente com 186 países, sendo o Brasil um deles. Desde então, os países têm se reunido para discutir o assunto e tentar encontrar soluções para o problema apresentado (ROCHA, 2003).

Figura 4 - Linha do tempo das principais ações para regulamentação da quantificação de GEE.



Fonte: Autora, 2021.

Durante a COP 1 em Berlim, contando com representantes de 117 países, estabeleceu-se o Mandato de Berlim, que teve como principal foco o consenso de todos os países em tomar ações mais enérgicas quanto à mitigação do efeito estufa (CETESBa, 2020). Entre outras resoluções, definiu-se que o compromisso dos países desenvolvidos em reduzir suas emissões de GEE para os níveis de 1990, até o ano de 2000, não seria suficiente para se atingir os objetivos de longo prazo da convenção. Nesse sentido, os países consentiram que deveria ser elaborado um protocolo ou instrumento com comprometimento legal entre eles, que tornasse oficial a questão, tendo como prazo definido para a apresentação do documento o ano de 1997 (CETESBa, 2020).

Segundo Rocha (2003), a Conferência das Partes realizada em Quioto em 1997 destaca-se como uma das mais importantes, uma vez que, durante sua realização,

estabeleceu-se um acordo que define as metas de redução das emissões de GEE para os países participantes, além de critérios e diretrizes para a utilização dos mecanismos de mercado. Esse acordo ficou conhecido como Protocolo de Quioto que estabelecia que os países industrializados devem reduzir suas emissões em 5,2% abaixo dos níveis observados em 1990 entre 2008-2012.

O Protocolo de Quioto define os gases considerados de efeito estufa e os setores da economia responsáveis por essas emissões, para assim poder determinar os percentuais de emissão e metas de redução (GODOY; PAMPLONA, 2007). Portanto, as metas quantitativas de redução são dirigidas a estes países industrializados e não aos países em desenvolvimento. O percentual que cada país deve reduzir foi definido depois de estudadas as emissões de cada um separadamente, sendo calculado de acordo com o maior ou menor grau de influência que cada um representa no clima mundial (GODOY; PAMPLONA, 2007).

Como determinação do Protocolo de Quioto, cada país membro, definido como redutor de GEE, deve apresentar um inventário anual de emissões de gases de efeito estufa, não controlados pelo Protocolo de Montreal, protocolo este que estabelece metas de redução na produção e consumo de substâncias responsáveis por sua destruição da camada de ozônio (ex.: Clorodifluorometano, Clorofluorcarbonetos, Brometo de Metila, Halon, Tetracloro de Carbono, etc.). Caso o país membro não cumpra a redução acordada, haverá procedimentos e mecanismos adequados e específicos de punição, a serem definidos, levando em conta a causa, o tipo, o grau e a frequência do não-cumprimento (GODOY; PAMPLONA, 2007).

Devido a criação do Protocolo de Quioto e a sua pressão exercida nos países, foram criadas diversas normas e metodologias para contabilização de emissões de GEE como *GHG Protocol*, *GHG Protocol Brasil* e a ABNT NBR ISO 14064. Todas com o objetivo de induzir as empresas e governos a quantificarem as suas emissões, para saberem quais são as principais emissões de GEE e tomar ações para reduzi-las através de metas. A primeira edição da Norma Corporativa, publicada em 2001, pelo *GHG Protocol* foi atualizada com orientações adicionais que esclarecem como as empresas podem medir as emissões de eletricidade e outras compras de energia e contabilizar as emissões de todas as suas cadeias de valor (GREENHOUSE GAS PROTOCOL, 2021).

A ISO 14064 (2007) fornece à indústria e ao governo um conjunto de ferramentas para desenvolver programas focados na redução das emissões de GEE (SGS, 2020). O

objetivo principal do processo era criar um procedimento tecnicamente rigoroso, mas neutro em termos de políticas, que fosse aplicável independentemente da política atual de mudança climática de um país, sem especialmente ter sua participação no Protocolo de Quioto das Nações Unidas (WINTERGREEN; DELANEY, 2007). Em agosto de 2006, é aprovada a ISO 14064 pela *American National Standards Institute as an American National Standard* e posteriormente é subdivida em 3 partes:

- ISO 14064-1:2006 - Parte 1: Especificação e orientação às organizações para quantificação e relação das emissões de gases de efeito de estufa e eliminações (ABNTa, 2001);
- ISO 14064-2:2006 - Parte 2: Guia com especificações para projeção de níveis para quantificação, monitoramento e relatórios das reduções de emissões de gases de efeito de estufa ou aumento de eliminações (ABNTb, 2001);
- ISO 14064-3:2006 - Parte 3: Guia com especificações para validação e verificação das afirmações sobre gases de efeito estufa (ABNTc, 2001);

Após a criação do *GHG Protocol* e ISO 14064, em 2008 houve a adaptação dos métodos de quantificação de emissões de GEE internacionais para o Brasil, chamado de Programa Brasileiro *GHG Protocol*. Nele são apresentadas as principais fontes de emissão do Brasil e fatores adaptados aos cenários brasileiros. Além disso, o *GHG Protocol* Brasil faz divulgação pública das emissões de GEE de instituições públicas e privadas que utilizam o seu método.

Conhecendo o perfil de emissões, a partir do diagnóstico do próprio inventário, qualquer organização pode dar o passo seguinte, que é estabelecer planos e metas para redução e gestão das emissões de gases de efeito estufa, engajando-se na solução desse enorme desafio que atinge o planeta. Com todos os lançamentos e criações de diversos métodos de quantificação e GEE e com as quantificações em si realizadas por governos e empresas privadas, surgem movimentos envolvendo a redução das emissões quantificadas por esses programas.

Em 2012 foi realizada a COP 18, que define metas de redução dos GEE para os países desenvolvidos como Austrália, Reino Unido, Noruega, Suíça, Ucrânia e países integrantes da União Europeia (CETESBb, 2020). Já durante a COP 21, que aconteceu em Paris, todos os 195 países participantes, entre eles o Brasil, engajaram-se em uma discussão que iria dar origem a um comprometimento de conter um aumento de

temperatura global, mantendo-o abaixo dos 2°C, mirando para que o aumento seja contido em torno de 1.5°C. Esse acordo passa, então, a ser conhecido como Acordo de Paris um dos maiores e mais significativos tratados ambientais, entrando em vigor de forma oficial no dia 4 de novembro de 2016 (CEBDS, 2019). Com o Acordo de Paris, vêm metas para reduzir as emissões e mitigar o aumento da temperatura na atmosfera. Uma forma de atingir essas metas para as empresas é usar o padrão de relatório de gases do efeito estufa (OLAUSSON, 2020).

Para regularização das metas surgem instituições como o *Science Based Target Initiative* (SBTi) - em 2015 - que definem diretrizes para metas baseadas na ciência, fornecem às empresas um caminho claramente definido para reduzir as emissões em linha com as metas do Acordo de Paris (SCIENCE BASED TARGET, 2021). Pode-se notar que há um caminho temporal com o desenvolvimento de ferramentas de quantificação e metas de redução de GEE.

Segundo Bento e Brunharo (2009), a capacitação de empresas e organizações na temática de inventários e temas correlatos a emissões de GEE são de extrema importância. Há muitos dos benefícios associados aos inventários de emissões, mas só se a informação se torna pública. Essa prestação de contas às partes interessadas garante transparência sobre dados de alta relevância para a sociedade na atualidade, que se depara com o desafio de combater o aquecimento global. A credibilidade de uma empresa e uma boa imagem corporativa podem ser garantidas por essa simples ação de publicar dados a respeito de sua “pegada carbônica”.

O termo “pegada de carbono” é um conceito derivado do conceito de pegada ecológica, desenvolvido pela primeira vez por William Rees e Mathis Wackernagel, na década de 1990, no artigo “*Urban Ecological Footprints – Why Cities Can Not Be Sustainable And Why They Are a Key To Sustainability*”. Segundo estes dois autores a pegada carbônica traduz se na “contabilização de emissões de dióxido de carbono do consumo de energia fóssil, estimando a área de floresta média que seria necessário para remover todo o dióxido de carbono, no pressuposto de que a estabilidade atmosférica é um pré-requisito da sustentabilidade” (REES; WACKERNAGEL, 1996 *apud* LI, 2018).

Em 2021 no dia 13 de novembro a COP 26 foi concluída em Glasgow, com todos os países concordando com o Pacto Climático de Glasgow para conter o aumento da temperatura em 1,5°C e finalizar os elementos pendentes do Acordo de Paris (UK GOVERNMENT, 2021). Para isso, os países estão sendo solicitados a apresentar metas

ambiciosas de redução de emissões para 2030 - metas alinhadas à redução de GEE de 1,5°C, que significa uma redução de 42% nas emissões em um período de 10 anos, conforme a metodologia de definição de metas do SBTi -, alinhadas com o alcance de “zero líquido” até a metade do século, - ou seja, se tornarem *Netzero* (termo usado quando o balanço de emissões de dióxido de carbono equivalente e a sua compreensão se tornam zero ou quando há eliminação das emissões) até o ano de 2050 -. Para cumprir essas metas, os países precisam (UK GOVERNMENT; UNFCCC, 2021):

- Acelerar a eliminação do carvão;
- Reduzir o desmatamento;
- Acelerar a transição para veículos elétricos;
- Incentivar o investimento em energias renováveis;

### 3.4 GREENHOUSE GAS PROTOCOL (*GHG Protocol*)

O *Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol)* surgiu quando o *World Resources Institute (WRI)* e o *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)* reconheceram a necessidade de um padrão internacional para a contabilidade e relatórios corporativos de GEE no final da década de 1990. Juntamente com grandes parceiros corporativos, como *British Petroleum* e *General Motors*, em 1998 o WRI publicou um relatório chamado “*Safe Climate, Sound Business*”. Identificou uma agenda de ação para abordar as mudanças climáticas que incluía a necessidade de medição padronizada das emissões de GEE (GREENHOUSE GAS PROTOCOL, 2021).

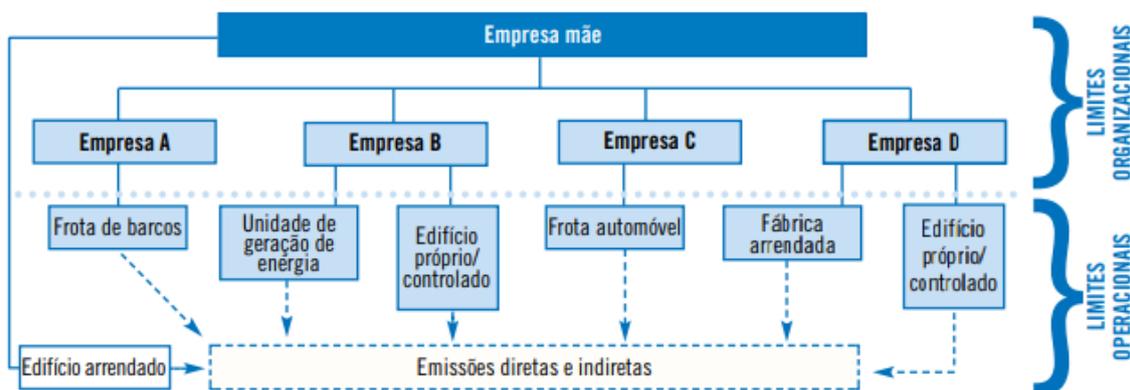
O *GHG Protocol* estabelece estruturas padronizadas globais abrangentes para medir e gerenciar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de operações dos setores público e privado, cadeias de valor e ações de mitigação (GREENHOUSE GAS PROTOCOL, 2021).

O *GHG Protocol* é uma ferramenta utilizada para entender, quantificar e gerenciar emissões de GEE que foi originalmente desenvolvida nos Estados Unidos, em 1998, pelo WRI e é hoje o método mais usado mundialmente pelas empresas e governos para a realização de inventários de GEE. É também compatível com a norma ISO 14.064 e com os métodos de quantificação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) (PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL, 2021).

O *GHG Protocol* provê diretrizes para a concepção de inventários corporativos, trabalhando conforme os limites operacionais e organizacionais. Deste modo, a quantificação das emissões de GEE dependerá da estrutura da empresa e do relacionamento desta com as partes envolvidas (SANQUETTA et. al., 2013).

As Normas Gerais do *GHG Protocol* definem duas abordagens distintas para definir os limites organizacionais de um Inventário de GEE e o critério de alocação das emissões à empresa inventariante: a consolidação por participação societária nas atividades inventariadas (na qual as emissões são alocadas conforme o percentual de ações pertencentes a empresa) e a consolidação por controle sobre as atividades (as emissões são alocadas para quem comanda as atividades da empresa) (FORUM CLIMA, 2013). Já os limites operacionais vêm após a determinação dos limites organizacionais. A empresa deverá estabelecer e documentar seus limites operacionais, o que envolve a identificação das emissões associadas às suas operações, classificando-as como emissões diretas ou indiretas e selecionando o escopo para contabilização e elaboração do inventário de emissões, os quais são definidos como Escopo 1, Escopo 2 e Escopo 3 (SANQUETTA et. al., 2013). Na Figura 5 são ilustrados os limites organizacionais e operacionais.

Figura 5 - Limites organizacionais e operacionais de uma empresa.



Fonte: Monzoni et. al., 2020.

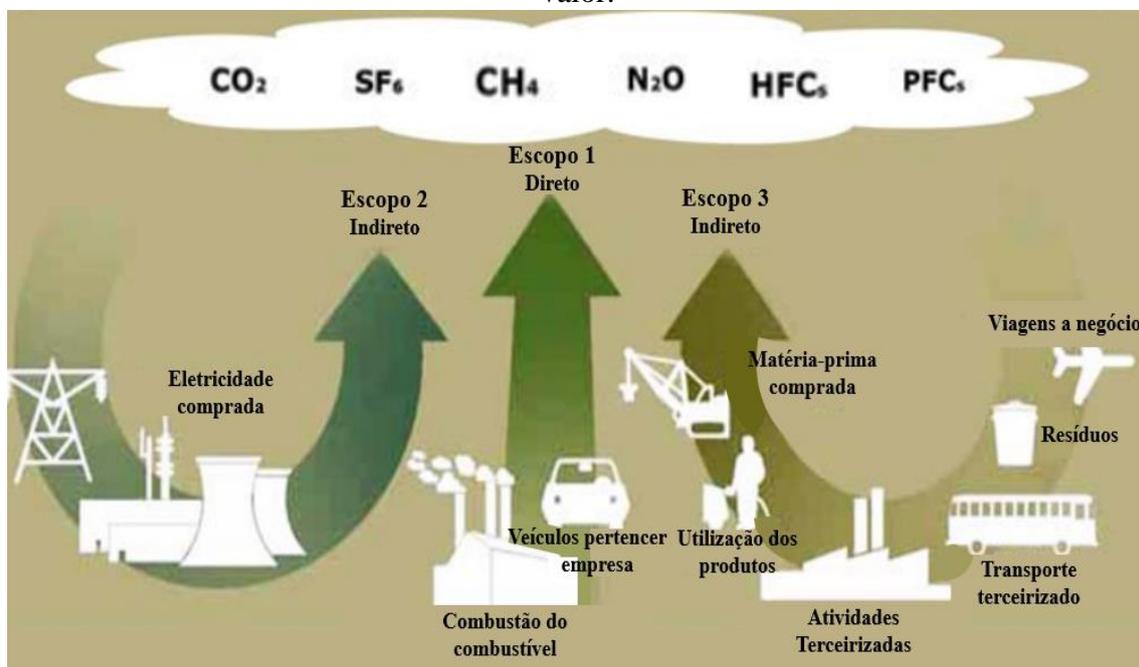
Três "escopos" (Escopo 1, 2 e 3) são definidos para contabilização de GEE; eles servem para ajudar a delinear as fontes de emissão direta e indireta, melhorar a transparência e fornecer uniformidade para diferentes tipos de organizações e diferentes tipos de políticas climáticas e objetivos de negócios (Figura 6). Os Escopos 1 e 2 são cuidadosamente definidos pelo *GHG Protocol* para garantir que duas ou mais empresas

não contabilizam as emissões no mesmo escopo. Isso torna os escopos passíveis de uso em programas de GEE, sendo a contagem dupla uma questão importante a ser levada em consideração para o relato de emissões, porque ela não pode acontecer (RANGANATHAN et.al., 2000). A contabilização dos Escopos 1 e 2 são obrigatórios pela metodologia, já a contabilização do Escopo 3 é opcional, ficando a critério das empresas.

Conforme apresentado na Figura 6, cada escopo tem uma finalidade para a contabilização de GEE dentro de uma organização e podem ser tratados da seguinte maneira:

- Escopo 1: Engloba as fontes de emissões de GEE, chamadas de emissões diretas, as quais a organização possui total responsabilidade e controle sobre;
- Escopo 2: Engloba as emissões de GEE geradas pelo consumo e compra de energia elétrica;
- Escopo 3: Engloba as fontes de emissão de GEE que não pertencem ou não são controladas pela empresa;

Figura 6 - Visão geral dos escopos e emissões do *GHG Protocol* em toda a cadeia de valor.



Fonte: Bento; Brunharo, 2009 (Adaptado pela Autora).

Em 2008 esse método foi adaptado ao contexto nacional pelo Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas (GVces) e pelo WRI em parceria com o Ministério do Meio Ambiente, com o Conselho (CEBDS), com o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) e 27 Empresas Fundadoras (PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL, 2021). A aplicação do método *GHG Protocol* no Brasil acontece de forma adaptada ao contexto nacional. O Programa Brasileiro *GHG Protocol* (*GHG Protocol* Brasil) organiza grupos de trabalho junto às empresas participantes, para o aperfeiçoamento do método e desenvolvimento de novas ferramentas para a contabilização de emissões de GEE de acordo com a realidade brasileira (PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL, 2021). Para incentivar as empresas a terem uma maior transparência, precisão e contabilização de todas as categorias de emissões sugeridas pela metodologia, o *GHG Protocol* Brasil utiliza um método de certificação na forma de selos (medalha de ouro, prata e bronze) que pode ser aplicado nos inventários de GEE conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Selos de Ouro, Prata e Bronze usados no pelo *GHG Protocol* Brasil.



Fonte: Waycarbon, 2016.

Para obter um destes selos é necessário atender os seguintes requisitos:

- Medalha de Ouro: ter um inventário de GEE verificado por organismo de verificação acreditado pelo Inmetro (WAYCARBON, 2016);
- Medalha de Prata: Publicar um inventário de GEE completo, incluindo todas as fontes do Escopo 1 e 2, e Escopo 3 opcional (WAYCARBON, 2016);
- Medalha de Bronze: Publicar um inventário de GEE parcial, que não necessariamente inclua todas as fontes de Escopo 1, 2 e 3 (WAYCARBON, 2016);

Algumas empresas que relatam quantidade de emissões de GEE geradas num determinado ano através do método *GHG Protocol* no Brasil são:

- AcelorMittal Brasil;
- Companhia Brasileira de Alumínio;
- Companhia Siderúrgica Nacional;
- Enel Green Power Brasil;
- Whirlpool;

Como pode-se notar as emissões relatadas através do *GHG Protocol* Brasil são feitas por empresas nacionais. Já em empresas multinacionais, os relatos das suas emissões de GEE é realizado com base nos padrões estabelecidos pelo *GHG Protocol*, que é um padrão internacional, tendo como exemplo:

- Schneider Electric;
- ABB;
- Robert Bosch GmbH;
- Mitsubishi Electric Corporation;
- BMW Group;

A ferramenta de relatório – do *GHG Protocol* - foi desenvolvida para ser usada por todos, independentemente do tamanho ou do estágio de desenvolvimento. Sua base é relatar dados relevantes que espelham ou reflitam as emissões da entidade, fornece uma visão completa e transparente sobre as emissões, reduzir as incertezas para obter dados mais precisos e usar um método de medição consistente. Em 2016, 92% das 500 maiores empresas da Fortune (500 maiores nos EUA com base na receita) relataram suas emissões de CO<sub>2</sub> com base em alguma variante do protocolo *GHG*. Além disso, a cidade de Londres, Madrid (em termos de população número três e seis na Europa), e Kampala (capital de Uganda) estão seguindo os três escopos do protocolo *GHG* (OLAUSSON, 2020).

Mesmo usando termos e conceitos parecidos, a ACV e a ISO 14040 têm objetivos e usos diferentes que a ISO 14064 e o *GHG Protocol*. Bhatia et. al. (2011) indica que os inventários de emissões realizados com a metodologia do *GHG Protocol* levam em consideração apenas as emissões de GEE que ocorrem durante o ciclo de vida de um

produto. Uma avaliação de um produto com essa metodologia fica limitada apenas à GEEs, tendo o benefício de simplificar a análise e produzir resultados que podem ser claramente comunicados às partes interessadas.

A limitação de uma análise apenas de emissões GEE é que os co-benefícios entre os impactos ambientais podem ser perdidos. Portanto, os resultados de quantificação de um ciclo de vida apenas de GEE não devem ser usados para comunicar o desempenho ambiental geral de um produto. Os impactos ambientais não-GEE (gases fora do protocolo de Quioto) que ocorrem durante o ciclo de vida de um produto também devem ser considerados na tomada de decisões para reduzir as emissões de GEE com base nos resultados do inventário (resultado final de um processo de quantificação de GEE). Exemplos de impactos não-GEE potencialmente significativos para alguns produtos incluem degradação do ecossistema, esgotamento de recursos, esgotamento da camada de ozônio e impactos negativos à saúde humana (BHATIA et. al., 2011).

Visto que a análise ACV completa de um produto pode ser relativamente complexa e demandar longo tempo de análise, as vezes dificultando sua execução pelas organizações, a metodologia escolhida neste trabalho é o *GHG Protocol*, apresentado na seção seguinte. Essa metodologia é mais simples e de fácil realização para organizações, embora só avalia o ciclo de vida do produto do ponto de vista de emissões de GEE.

### **3.4.1 Escopo 1 – Emissões de diretas geradas nas operações da organização**

As emissões presentes no Escopo 1 são todas aquelas que são pertencentes à organização. As emissões diretas de GEE ocorrem a partir de fontes que são de propriedade ou controladas pela empresa, por exemplo, emissões da combustão em caldeiras, fornos, veículos, etc.; emissões de produtos químicos produção em equipamentos de processo próprios ou controlados. As emissões de GEE não cobertas pelo Protocolo de Quioto, por exemplo: CFCs, NO<sub>x</sub>, etc. não devem ser incluídas no Escopo 1 (RANGANATHAN et.al., 2000). O Programa Brasileiro *GHG Protocol* classifica as emissões do Escopo 1, que são emissões diretas de GEE em seis categorias distintas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Categorias de emissões de GEE que compõem o Escopo 1 do *GHG Protocol* Brasil.

Nº	Categorias	Descrição
1	Combustão estacionária	Aplica-se às emissões geradas na queima de combustível para produção de energia que não são aplicadas para deslocamento de modais de transporte.
2	Combustão móvel	Aplica-se às emissões geradas na queima de combustível, para produção de energia aplicada para o deslocamento de modais.
3	Processos industriais	Aplica-se às emissões geradas na transformação química ou física de algum material decorridos nos processos produtivos, com exceção da sua combustão.
4	Resíduos sólidos e efluentes líquidos	Aplica-se às emissões de GEE provenientes do tratamento de resíduos sólidos e de efluentes líquidos que são tratados pela empresa.
5	Fugitivas	Aplica-se às emissões do funcionamento de equipamentos em que utilizam gases para o resfriamento.
6	Agrícolas e mudanças no uso do solo	Aplica-se às emissões de atividades de agricultura, pecuária ou de mudanças no uso do solo.

Fonte: GVCESa, 2016 (Adaptado pela Autora).

As emissões diretas de GEE são principalmente o resultado dos seguintes tipos de atividades realizadas por empresas:

- Geração de eletricidade, calor ou vapor: essas emissões resultam da combustão de combustíveis em sistemas estacionários, por exemplo, caldeiras, fornos, turbinas, etc. (RANGANATHAN et.al., 2000);
- Processamento físico ou químico: a maioria dessas emissões resulta da fabricação ou processamento de produtos químicos e materiais, por exemplo, cimento, alumínio, ácido adípico, fabricação de amônia e processamento de resíduos (RANGANATHAN et.al., 2000);
- Transporte de materiais, produtos, resíduos e funcionários: essas emissões resultam da combustão de combustíveis em dispositivos móveis pertencentes/controlados pela empresa fontes de combustão por exemplo, caminhões, trens, navios, aviões, ônibus e carros (RANGANATHAN et.al., 2000);
- Emissões fugitivas: essas emissões resultam de liberações intencionais ou não intencionais, por exemplo, vazamentos de equipamentos, emissões de minas de carvão e ventilação, emissões de hidrofluorcarbono (HFC) durante o uso

de refrigeração e equipamentos de ar condicionado e vazamentos de metano do transporte de gás (RANGANATHAN et.al., 2000).

### **3.4.2 Escopo 2 – Emissões indiretas geradas da compra de energia**

O Escopo 2 contabiliza as emissões de GEE da geração da eletricidade comprada e consumida pela empresa. Eletricidade comprada é definida como eletricidade que é comprada ou de outra forma enviada para a organização limite da empresa. As emissões do Escopo 2 fisicamente ocorrem na instalação onde a eletricidade é gerada.

Para muitas organizações, a energia adquirida representa uma das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a oportunidade mais significativa de reduzi-las. Nos inventários de GEE, as emissões associadas à energia adquirida por uma organização, comprada ou trazida para dentro de seus limites organizacionais, devem ser contabilizadas no Escopo 2 (GVCESa, 2018).

Todavia, para as empresas não havia indicação de como deveriam ser contabilizadas essas emissões. Por isso, Sotos (2015) criou o *GHG Protocol Scope 2 Guidance*, que possui todas as diretrizes necessárias para realizar a quantificação das emissões de GEE geradas na compra de energia.

Outra razão importante para empresas rastream essas emissões é que esse dado pode ser necessário para alguns programas de reduções de GEE. As empresas podem reduzir o uso de eletricidade investindo em tecnologias de eficiência energética e conservação de energia. Além disso, os mercados emergentes de “energia verde” fornecem oportunidades para algumas empresas mudarem para fontes geradoras de energia elétrica que emitam menos GEE (RANGANATHAN et.al., 2000).

As empresas também podem instalar uma planta de cogeração eficiente no local, especialmente se substituir a compra de eletricidade com maior intensidade de GEE da rede ou do fornecedor de eletricidade. No Relatório de Escopo 2 das emissões é possível contabilizar de forma transparente as emissões de GEE e as reduções associadas às oportunidades de ações ou mudanças (RANGANATHAN et.al., 2000).

No Brasil, o Programa Brasileiro *GHG Protocol* possui uma nota técnica para a contabilização de emissões de Escopo 2 em inventários organizacionais de GEE. Esta nota técnica constitui diretrizes que diz respeito especificamente à aquisição de energia elétrica que é consumida pelas organizações (GVCESa, 2018).

O Programa Brasileiro *GHG Protocol* determina a utilização obrigatória do *GHG Protocol Scope 2 Guidance* e da nota técnica produzida pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) para a contabilização de emissões de GEE por aquisição de eletricidade.

O Guia traz como diretriz a adoção de duas abordagens distintas para contabilização das emissões do Escopo 2 nos inventários de GEE. Ambas abordagens são úteis para diferentes fins e, juntas, fornecem informações completas que permitem às organizações realizarem avaliações de riscos, mapeamento de oportunidades de redução de emissões e gestão nas emissões relacionadas à aquisição de energia elétrica (GVCESa, 2018). Diferente do Escopo 1, o Escopo 2 não é subdividido em categorias, mas é dividido em 2 tipos de abordagens: baseado na localização e no mercado.

O método de localização é usado para calcular as emissões de GEE com base na emissão média de geração da energia, sendo aplicado em regiões onde a produção e a distribuição de energia funcionam da mesma forma, ou seja, com pouca variação. O método baseado em localização é baseado em informações e produção de eletricidade agregada e média dentro de um limite geográfico definido e durante um determinado período de tempo (SOTOS, 2015).

Já a abordagem baseada no mercado reflete as emissões de GEE associado às escolhas que um consumidor faz em relação a fornecedor ou produto de eletricidade (SOTOS, 2015). Esta abordagem quantifica as emissões de GEE utilizando o fator de emissão específico associado a cada fonte de geração da eletricidade que a organização escolheu adquirir (GVCESa, 2018).

Tendo em vista a existência de duas possíveis formas de relato de Escopo 2, o Programa Brasileiro *GHG Protocol* estabelece como obrigatório o uso da abordagem baseada na localização para todas as organizações. O relato utilizando a abordagem baseada no mercado é voluntário e adicional à abordagem baseada na localização (GVCESb, 2018).

### **3.4.3 Escopo 3 - Emissões indiretas de fontes não pertencentes a organização**

O cálculo das emissões do Escopo 3 é opcional, não sendo obrigatório por nenhuma norma ou diretriz como o *GHG Protocol*, *GHG Protocol Brasil* e ISO 14064. Mas o seu relato vem se tornando uma prática de mercado muito comum nos últimos anos, por oferecer uma visão maior de quais são as emissões reais da organização como

um todo e, como elas podem ser reduzidas através da formulação de metas que relacionam as emissões de GEE com o aumento de temperatura global, que também é uma prática comum entre as grandes empresas. O estabelecimento de metas não é só uma prática de mercado, mas também uma maneira das empresas mostrarem à sociedade em geral e seus investidores que a empresa adota ações mais sustentáveis e preocupada com os problemas gerados com o aquecimento global, servindo assim, como marketing verde e sustentável para as empresas.

A quantificação das emissões de GEE do Escopo 3 permite o tratamento de todas as outras emissões indiretas que a empresa produz. As emissões de Escopo 3 são consequências das atividades da empresa, mas ocorrem a partir de fontes não pertencentes ou controladas pela empresa (RANGANATHAN et.al., 2000).

As atividades comumente incluídas no Escopo 3, desde que não se caracterizem como de emissão direta, são:

- Extração e produção de materiais e combustíveis comprados (BENTO; BRUNHARO, 2009);
- Atividades relacionadas ao transporte de materiais ou bens comprados em veículos que não sejam da organização, de combustíveis comprados, de produtos vendidos, de resíduos, viagens de negócios dos colaboradores, deslocamento dos colaboradores no trajeto casa-trabalho-casa (BENTO; BRUNHARO, 2009);
- Atividades relacionadas ao consumo de energia elétrica que não estejam incluídas no Escopo 2 (extração, produção e transporte de combustíveis, para consumo na produção de eletricidade, compra de eletricidade para revenda ao consumidor final, produção de eletricidade consumida num sistema de T&D) (BENTO; BRUNHARO, 2009);
- Bens arrendados, franquias e atividades terceirizadas (BENTO; BRUNHARO, 2009);
- Utilização de produtos e serviços vendidos (BENTO; BRUNHARO, 2009);
- Tratamento de resíduos produzidos em operações, gerado pela produção de materiais e combustíveis comprados ou dos produtos vendidos no final de sua vida (BENTO; BRUNHARO, 2009);

Para a quantificação de GEE do Escopo 3, existe o documento base a ser utilizado, desenvolvido por Barrow et.al. (2013) o *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions*, cujo objetivo principal é fornecer um passo-a-passo padronizando à abordagem para ajudar as empresas a compreender o total de emissões e o impacto dessas na cadeia, a fim de identificar e concentrar esforços nas oportunidades de redução de GEE, levando à tomada de decisões mais sustentáveis sobre as atividades das empresas e os produtos que compram, vendem e produzem.

O *Technical Guidance for Calculating Scope 3* oferece uma metodologia para gestão e mapeamento da geração de GEE nas atividades realizadas pela empresa desde a contratação de fornecedores, produção, até a fase final de distribuição do produto, ou seja, considerando toda a cadeia de valor da organização. Para englobar todas as atividades realizadas em diversos setores o Escopo 3 se subdivide em quinze categorias distintas, que incluem todas as emissões indiretas que podem ocorrer dentro da cadeia de valor de uma empresa. Na Tabela 2 são apresentadas as descrições e nomes das quinze categorias de emissões de GEE que compõem o Escopo 3.

A diferença entre os bens das categorias 1 e 2 é que na categoria 1 são consideradas as emissões “*cradle-to-gate*” (do berço ao portão), que são as emissões que ocorrem no ciclo de vida dos produtos adquiridos, até o ponto de recebimento pela empresa que realiza o inventário (excluindo emissões de fontes que pertencem ou são controladas pela empresa relatora). Já na categoria 2, os bens de capital são aqueles que têm uma vida útil prolongada e são usados na produção de produtos, serviços, armazenagem e entrega. Exemplo: equipamentos, máquinas, edifícios, instalações e veículos.

Tabela 2 - Categorias de emissões de GEE que compõem o Escopo 3 do *GHG Protocol*.

Nº	Categorias	Descrição
1	Bens e serviços adquiridos	Aplica-se às emissões “ <i>cradle-to-gate</i> ” (do berço ao portão) da produção de bens e serviços adquiridos pela empresa e não incluídos em outras categorias.
2	Bens de capital	Aplica-se às emissões “ <i>cradle-to-gate</i> ” (do berço ao portão) geradas na produção de bens de capital adquiridos pela empresa.
3	Combustível e energia não incluídos no Escopo 1 e 2	Aplica-se às emissões relacionadas à produção de combustíveis e energia compradas e consumidas pela empresa.
4	Transporte e distribuição	Aplica-se às emissões de transporte e distribuição de

	<i>upstream</i> (do berço ao portão)	produtos comprados ou adquiridos pela empresa.
5	Resíduos gerados nas operações	Aplica-se às emissões provenientes do descarte e tratamento de resíduos sólidos e efluentes realizados por empresas terceirizadas.
6	Viagem de negócios	Aplica-se às emissões decorrentes do transporte de colaboradores para atividades comerciais em veículos pertencentes ou operados por terceiros.
7	Deslocamento dos funcionários	Aplica-se às emissões provenientes do transporte dos colaboradores das suas residências para seus locais de trabalho.
8	Ativos alugados pela empresa	Aplica-se às emissões da operação de ativos que são alugados pela empresa.
9	Transporte e Distribuição <i>Downstream</i> (do portão ao consumidor)	Aplica-se às emissões geradas no transporte e distribuição de produtos vendidos em veículos e instalações não pertencentes ou controladas por terceiros.
10	Processamento de produtos vendidos	Aplica-se às emissões geradas no processamento de produtos intermediários vendidos por terceiros e comprados pela empresa.
11	Uso de produtos vendidos	Aplica-se às emissões provenientes do uso final de bens e serviços vendidos pela empresa.
12	Tratamento de fim de vida de produtos vendidos	Aplica-se às emissões geradas na destinação dos produtos vendidos pela empresa no final de seu ciclo de vida.
13	Ativos alugados a terceiros	Aplica-se às emissões a operação de ativos que são propriedade da empresa e são alugadas a terceiros.
14	Franquias	Aplica-se às emissões provenientes da operação de franquias.
15	Investimentos	Aplica-se às emissões associadas aos investimentos da empresa. Essa categoria é projetada principalmente por instituições financeiras privadas.

---

Fonte: GVCESb, 2018 (Adaptado pela Autora).

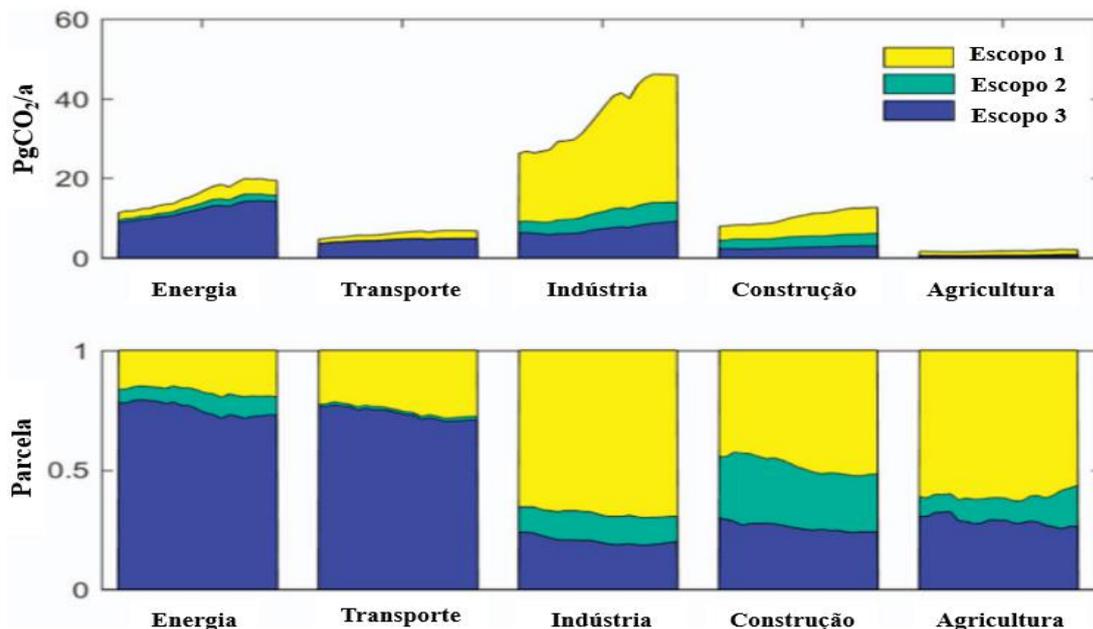
### 3.4.3.1 Importância da quantificação das emissões de GEE do Escopo 3

As emissões do Escopo 2 e 3 são consideradas emissões indiretas, conforme a Figura 6, pois elas não são geradas nas dependências da empresa, mas são geradas por terceiros e fornecedores que vendem algum produto ou serviço a ela. Sendo assim, a empresa contratante não possui o controle e a responsabilidade total da situação. Mas a diferença entre eles está na sua obrigatoriedade de quantificação, pela metodologia do *GHG Protocol* as emissões do Escopo 2 são obrigatórias a todas as organizações, pois o consumo e a fonte de energia podem ser controlados pelas empresas. O mesmo não ocorre

com o Escopo 3, cujas emissões fogem do controle operacional e da responsabilidade da empresa contratante, não sendo consideradas obrigatórias a sua quantificação. As emissões de Escopo 3, mesmo não sendo obrigatórias, compõem o maior percentual de emissões dentro da cadeia de valor, sendo o seu relato de extrema importância para determinar as emissões reais de GEE que ocorrem dentro da organização.

Em 2015, as emissões indiretas (Escopos 2 e 3) de combustão de combustível de fósseis nas cadeias de abastecimento de todos os setores totalizou 55 Pg CO<sub>2</sub>, acima dos 30 Pg em 1995, crescendo 83% (Figura 8) (HERTWICH; WOOD, 2018). Em comparação, as emissões diretas cresceram 47% no mesmo período. Na Organização para a Cooperação e Desenvolvimento (OCDE<sup>1</sup>), as emissões diretas aumentaram em 4% e as emissões indiretas em 20%; em países não pertencentes à OCDE<sup>1</sup>, as emissões diretas dobraram, enquanto as emissões indiretas aumentaram duas vezes e meia, como apresentando Figura 9 (HERTWICH; WOOD, 2018).

Figura 8 - Emissões dos Escopos 1, 2 e 3 do *GHC Protocol* dos cinco setores (energia, transporte, indústria, Construção Civil e Agricultura) do IPCC durante o período de 1995-2015.

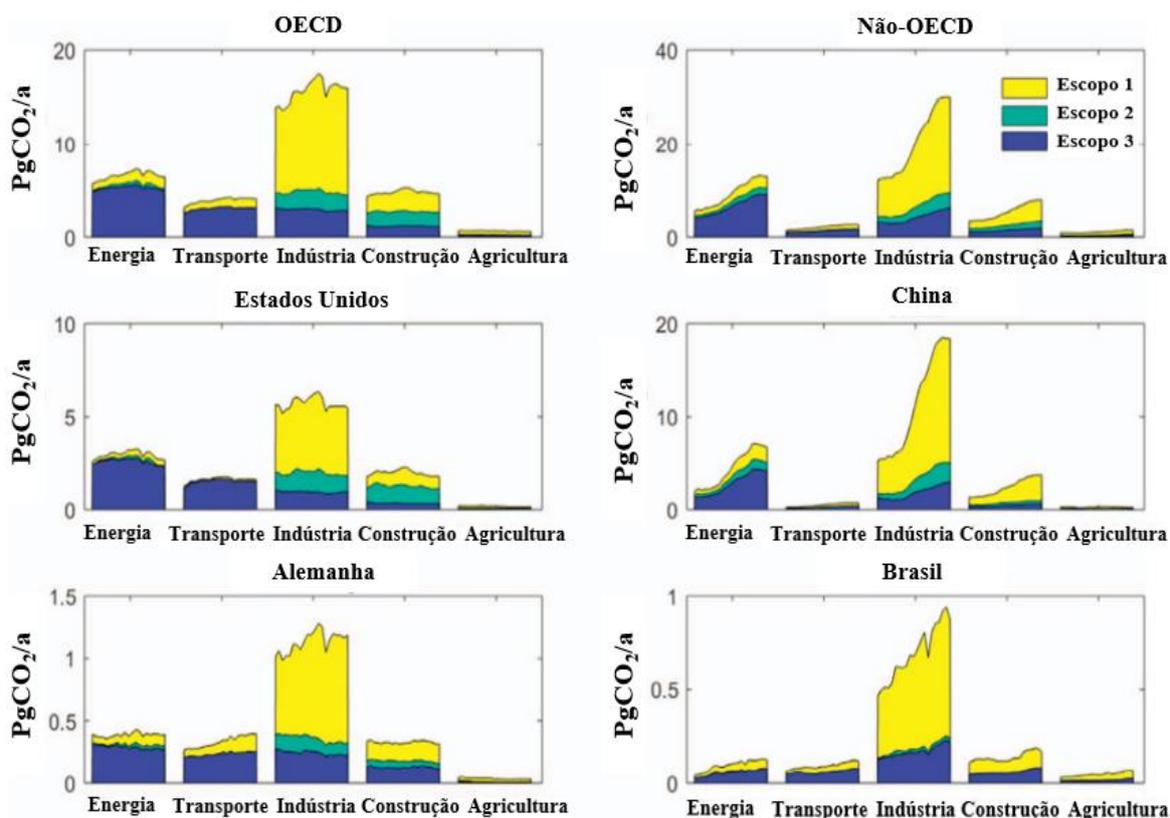


Fonte: Hertwich e Wood, 2018 (Adaptado pela Autora).

<sup>1</sup> A OCDE - Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico é formada pelos seguintes países: Canadá, México, Estados Unidos da América, Áustria, Bélgica, República Tcheca, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Islândia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Holanda, Noruega, Polônia, Portugal, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido, Austrália, Japão, Coreia do Sul, Nova Zelândia.

A crescente importância das emissões da cadeia de abastecimento indica que produtores intermediários podem ter uma influência muito maior sobre emissões do que antes. O setor da indústria, conforme definido pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), que inclui desde matadouros a operadoras de turismo, apresentou de longe o maior número de emissões indiretas de 37 Pg. No setor de construção as emissões indiretas foram de 10 Pg, três vezes mais altas do que as emissões diretas. As emissões indiretas para o setor de energia foram cerca de  $\frac{1}{3}$  das emissões diretas, e as do setor de transporte foram  $\frac{2}{5}$  emissões diretas (as emissões do uso de transporte pelos consumidores é incluída nas emissões diretas). Para a agricultura, silvicultura e outros usos da terra, as emissões indiretas foram quase três vezes mais altas que as emissões diretas, um cenário que muda drasticamente quando as emissões de  $N_2O$  e  $CH_4$  estão incluídas (HERTWICH; WOOD, 2018).

Figura 9 - Emissões dos Escopos 1, 2 e 3 de países da OCDE e não membros da OCDE, e dos países China, Alemanha, Brasil e Estados Unidos.



Fonte: Hertwich e Wood, 2018 (Adaptado pela Autora).

A Figura 9 mostra que há aumento rápido de emissões de Escopo 3 nos países como a China e Brasil (não pertencentes à OCDE), que estão em desenvolvimento, enquanto os países mais industrializados como Estados Unidos e Alemanha (pertencentes à OCDE), apresentam uma tendência a estabilizar e até diminuir suas emissões. Devido a isso, mesmo essa categoria não ser considerada obrigatória, a sua quantificação é extremamente expressiva quando falamos de emissões de toda cadeia de valor.

### 3.5 PROCESSO DE FUNDIÇÃO E EMISSÕES RELACIONADAS

A fundição é um dos processos de transformação de metais e ligas metálicas no seu estado líquido ou fundido para fabricação de peças com grande variedade de formas e tamanhos, principalmente para indústria mecânica e automobilística. O processo é flexível para obtenção de uma ou mais peças, e consiste no derramamento de uma carga fundida com composição adequada em uma cavidade conformada de acordo com o negativo da peça desejada, também chamada de molde (BALDAM, 2014; CHIAVERINI, 1986; SOARES, 2000 *apud* MUNHOZ, 2017). O processo de fundição das peças de ferro fundido, realizado em unidades de fundição, é constituído pelas fases de preparo e posteriormente o enchimento dos moldes de areia com ferro fundido, desmanche dos moldes, e, depois de pesado o período de resfriamento, acabamento e superfície da peça (MATOS, 2020).

A indústria de fundição contribui para a sociedade atendendo a demanda da reciclagem de sucata metálica, mas, ao mesmo tempo, possui um alto risco de impacto ambiental por gerar uma série de resíduos potencialmente contaminantes. Entre estes, estão a escória e as areias usadas (em especial aquelas geradas nos processos de moldagem por cura a frio) de fundição (MORAES et. al., 2013). O grande problema das empresas de fundição são os seus resíduos sólidos, constituídos em sua maioria pelas areias usadas na confecção dos moldes e machos, escórias e poeiras (MORAES et. al., 2013). Tendo em vista isso, são apresentados na Tabela 3 os principais impactos e aspectos ambientais da fundição.

As emissões gasosas resultantes dos processos de fundição são constituídas por CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e compostos de flúor, por curtos períodos podem ocorrer emissões de formaldeídos, fenóis, amoníaco, aminas, compostos de cianetos, e hidrocarbonetos aromáticos oriundos dos moldes de macharia. Nesse processo, há formação de poeira

durante a preparação da área para moldes e para peças, na fundição do material, no resfriamento das peças fundidas, na retirada das peças dos moldes e, principalmente, no tratamento superficial das peças (MATOS, 2020).

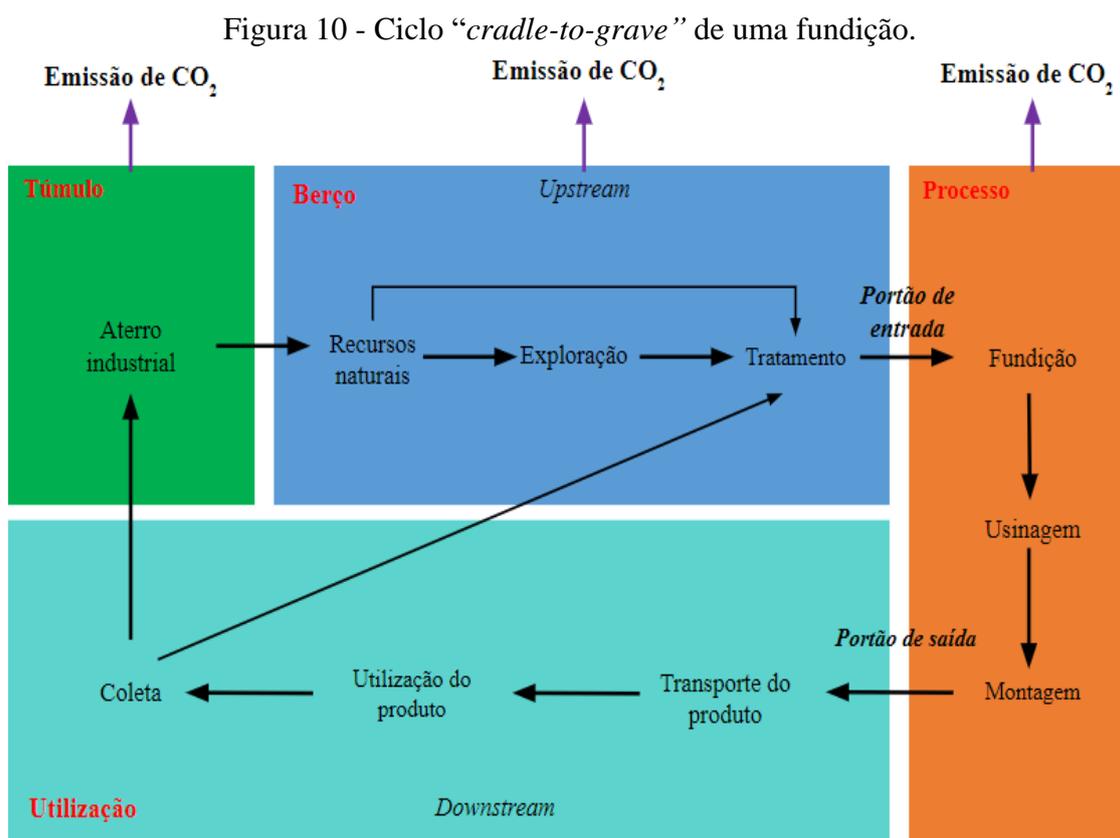
Tabela 3 - Principais aspectos e impactos gerados no processo de fundição.

<b>Fonte</b>	<b>Aspecto ambiental</b>	<b>Impacto ambiental</b>
Transporte da matéria prima	Consumo de combustível	Esgotamento dos recursos naturais
Armazenamento	Consumo de matéria-prima	Contaminação da água, solo e esgotamento dos recursos naturais,
Carga da matéria-prima no forno	Consumo de energia, emissão de material particulado	Esgotamento dos recursos naturais e alteração da qualidade do ar
Forno de indução	Consumo de energia, geração de escória e emissões atmosféricas	Contaminação da água e solo, esgotamento dos recursos naturais e alteração da qualidade do ar
Torre de resfriamento	Consumo de energia e água	Contaminação da água, solo e esgotamento dos recursos naturais
Misturador de areia	Consumo de energia, água, areia, resina, catalisadores e emissão de material particulado	Contaminação da água, solo, ar e esgotamento dos recursos naturais
Fabricação dos moldes	Consumo de energia e emissão de material particulado	Esgotamento dos recursos naturais e alteração da qualidade do ar
Desmoldagem	Consumo de energia, geração de resíduo (areia de fundição)	Contaminação da água, solo e esgotamento dos recursos naturais
Lavador de gases	Consumo de energia e água	Contaminação da água, solo e esgotamento dos recursos naturais
Jateamento	Consumo de energia	Esgotamento dos recursos naturais e emissão de material particulado
Transporte por empilhadeira (GLP)	Consumo de combustível	Esgotamento dos recursos naturais

Fonte: Autora, 2021.

Nas unidades de fundição, grandes quantidades de resíduos sólidos (areia usada na confecção das formas, pedaços de peças, escória de fornos, além do lodo proveniente do tratamento de gases) são produzidas. As águas residuais e o lodo do lavador de gases instalados como tratamento das emissões atmosféricas do setor podem conter substâncias perigosas para saúde humana e meio ambiente como Cd, Pb e Zn, além de fenóis, comumente liberados dos aglomerantes usados junto à areia de moldagem das peças (MATOS, 2020).

Todo o processo de fundição e seus impactos ambientais culminam no ciclo de vida apresentado na Figura 10. A Figura 10 mostra o ciclo “*cradle-to-grave*” (do berço ao túmulo) completo do processo de fundição. Perceba que esse processo contempla a cadeia de abastecimento *upstream* (transporte do berço até a saída do produto pelo portão), que fornece insumos para fundição, e a cadeia de abastecimento *downstream* (do portão ao consumidor final) que entrega os produtos finais.



Fonte: Helber, 2016 (Adaptado pela Autora).

A fundição não encontra paralelo com outros processos de conformação pelo fato de que, em muitos casos, é o método mais simples e econômico e, em outros, o único método tecnicamente viável de se obter uma determinada forma sólida. Dentre os processos de fabricação, a fundição se destaca por permitir a produção de peças com grande variedade de formas e tamanhos (ex.: sinos, âncoras, tubulações, implantes ortopédicos, bloco de motor, miniaturas) (SOARES, 2000). Na empresa avaliada os produtos criados a partir do ferro fundido são as carcaças dos motores elétricos. Essas carcaças seguem todos conceitos descritos anteriormente e são uma parte chave de um motor elétrico industrial ou comercial. Como será visto na sequência, as carcaças possuem diversas formas e tamanhos, adequadas para cada tipo de motor.

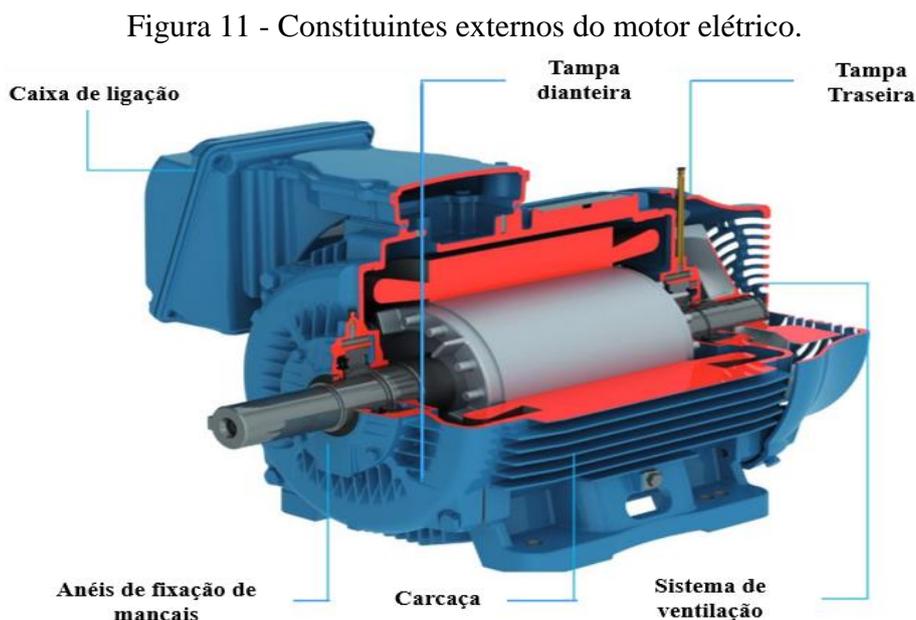
### 3.6 MOTORES ELÉTRICOS

Os motores elétricos são dispositivos que convertem energia elétrica em energia magnética e, finalmente, em energia mecânica. O eletromagnetismo é a base da operação do motor elétrico, gerando as forças magnéticas necessárias para produzir movimento rotacional ou linear. Para motores elétricos rotativos, é a interação entre os campos magnéticos do estator e do rotor que cria motor de torque para acionar cargas externas (TONG, 2014).

Existem basicamente dois tipos de motores elétricos: os motores de corrente contínua e os motores de corrente alternada. Os motores de corrente contínua são acionados a partir de uma fonte de corrente contínua e possuem a vantagem de poder ter sua velocidade alterada simplesmente sob uma variação na tensão elétrica aplicada. Esses motores podem ser subdivididos de acordo com o modo de conexão do indutor e das bobinas induzidas, sendo classificados em motores paralelos, motores em série, motores compostos, e motores de excitação independentes; podendo ser encontrados em eletrodomésticos, equipamentos industriais, dentre outras aplicações. Já os motores de corrente alternada são mais comumente usados, e são subdivididos entre motores monofásicos (que são alimentados por apenas um condutor de fase e onde não há rede trifásica disponível) e trifásicos. Os motores de corrente alternada também podem ser classificados entre motores síncronos e assíncronos. Os motores síncronos giram sempre na mesma velocidade do campo girante, conhecida como velocidade síncrona, que

depende diretamente da frequência da corrente alternada. Já os motores assíncronos giram em uma velocidade sensivelmente menor do que a velocidade de rotação do campo eletromagnético rotativo, ou campo girante, devido ao fator de escorregamento. Também chamado de motor de indução, os motores assíncronos são os tipos de motores de corrente alternada mais utilizados, graças ao baixo custo de fabricação, construção simples, porém robusta, e pelo funcionamento confiável e satisfatório (MATTEDE, 2022).

Na Figura 11, há um exemplo de um motor elétrico trifásico comercial, onde são vistos todos os seus elementos constituintes externos. Atualmente os motores elétricos vêm em uma ampla variedade de tipos, tamanhos, características operacionais, e configurações para se adequar a diferentes aplicações. Eles são usados em quase todos os lugares no mundo, incluindo unidades industriais, eletrodomésticos, dispositivos médicos, produtos eletrônicos, robôs, veículos elétricos, máquinas-ferramenta, naves espaciais e equipamento militar (TONG, 2014).



Fonte: WEG, 2020 (Adaptado pela autora).

Hoje, os sistemas movidos a motor elétrico respondem por aproximadamente 45% do consumo global de eletricidade total. Em 2030, o consumo de energia de motores elétricos deverá aumentar para 13.360 terawatts-hora (TWh) por ano. Os usuários finais agora gastam USD 565 bilhões por ano em eletricidade usada em sistemas movidos a motor elétrico; em 2030, isso poderá subir para quase USD 900 bilhões. Nos Estados

Unidos, os equipamentos movidos a motor contabilizam 64% da eletricidade consumida na indústria de manufatura. Isso é aproximadamente 290 bilhões de quilowatts-hora (kWh) de energia por ano (TONG, 2014).

Existem mais de 40 milhões de motores elétricos utilizados na operação de fabricação. Além disso, mais de 95% dos impactos do ciclo de vida do motor elétrico é relacionado ao consumo de energia durante o seu uso. Na China, estima-se que cerca de 60% da geração anual de energia é consumida por meio de sistemas motorizados. Tudo isso claramente mostra como é importante tomar uma variedade de medidas para promover a eficiência do motor elétrico para a economia de energia e redução da emissão de carbono (TONG, 2014).

### 3.6.1 Carcaças de motores elétricos

Segundo Oliveira (2009), a carcaça é confeccionada de um material robusto para dar sustentação e proteção ao motor. Os materiais que a constituem são variados, e baseiam-se principalmente na aplicação e exposição do motor. Para motores de uso doméstico ou cujo equipamento a que serão acoplados provém proteção o suficiente, as carcaças não passam de um sustentáculo para as chapas do estator. Em aplicações onde o motor ficará exposto a atmosferas agressivas ou mesmo explosivas, a proteção mecânica não é o suficiente, e vedações e pintura diferenciada são usadas de modo a tornar a carcaça resistente às agressões do meio à qual estará exposta (OLIVEIRA, 2009). Na Figura 12 apresenta a carcaça de e um motor elétrico trifásico de uso comercial fabricada com ferro fundido cinzento.

Figura 12 - Carcaça do motor elétrico trifásico.



Fonte: WEG, 2020.

Um fator importante relacionado ao ferro fundido é sua boa condutibilidade térmica, essencial para motores blindados. Nesse tipo de motores, encontramos aletas distribuídas ao redor de sua superfície externa, feitas para aumentar a superfície de contato com o ar e, assim, aumentar a dissipação térmica do motor (OLIVEIRA, 2009).

### 3.7 FERRO FUNDIDO

Os ferros fundidos são ligas com grande aplicação em engenharia mecânica e na indústria automobilística sendo empregados, por exemplo, na fabricação de blocos de motores de combustão interna ou peças de motores em geral. Estas ligas oferecem custos de produção relativamente baixos, propriedades mecânicas satisfatórias, além de elevada resistência à corrosão em altas temperaturas (FRANCKLIN, 2009).

Os ferros fundidos são definidos, segundo Chiaverini (1996), como “ligas Ferro-Carbono cujo teor de carbono se situa acima de 2,0% em peso aproximadamente”. No entanto, a maioria dos ferros fundidos contém entre 3% e 4,5% de carbono, além de outros elementos de liga. Essas composições são totalmente fundidas em temperaturas em torno de 1150°C e 1300°C; que são apreciavelmente menores que para a fusão de aços, sendo, portanto, mais facilmente fundidas (CALLISTER, 2006).

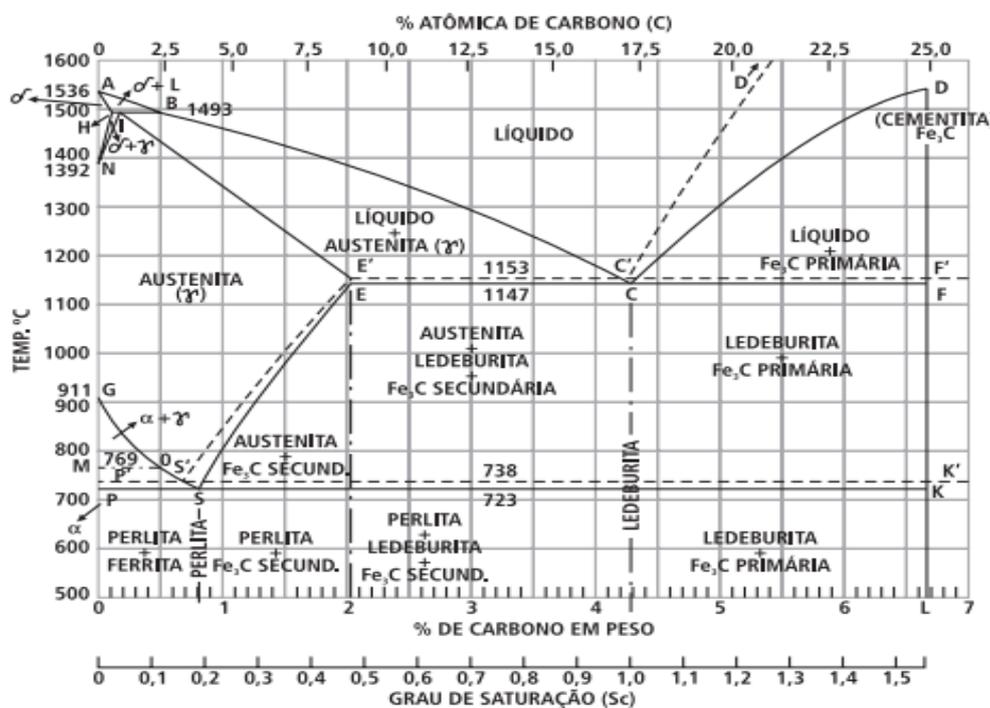
Normalmente, os ferros fundidos são obtidos a partir de um carregamento que consiste basicamente de ferro-gusa, retorno de fundição (ou sucata interna) e sucata de aço, devidamente balanceados para obtenção da composição desejada. Além disso, são adicionadas ferro-ligas para correção de teores dos diversos elementos. Após a fusão, o metal é inoculado – normalmente com liga Fe-Si – em panela ou diretamente no molde, com intuito de garantir uma microestrutura de células eutéicas pequenas e homogêneas. Assim, os fundidos são ligas complexas com vários elementos de liga e impurezas, entre eles o Manganês (Mn), Fósforo (P) e enxofre (S).

A adição de determinados elementos na liga altera a microestrutura do ferro fundido, modificando as suas propriedades de rigidez e ductilidade. O Silício (Si), Alumínio (Al) e o Níquel (Ni) favorecem a formação de grafita e conferem maior usinabilidade à peça. O Cromo (Cr), o Manganês (Mn), o Molibdênio (Mo) e o Vanádio (V) favorecem a formação de cementita, conferindo maior dureza e resistência mecânica à liga. O potássio e o enxofre são considerados impurezas e devem ser mantidos em baixas

concentrações. O enxofre reduz a tenacidade do material e o potássio eleva a dureza (CASOTTI, BEL FILHO, CASTRO, 2011).

Outros fatores que alteram a microestrutura e influenciam nas propriedades mecânicas dos ferros fundidos são a velocidade de resfriamento, que ao ser elevada favorece a formação de cementita, e a inoculação, a qual com a formação de núcleos torna as microestruturas mais homogêneas e promove a formação de grafita. Em geral, as ligas de ferro fundido possuem uma fase pró-eutética de austenita e grafita e uma fase eutética de austenita grafita ou de austenita e carbonetos como pode ser observado no Diagrama de Equilíbrio Fe-C da Figura 13, apresentando as fases de equilíbrio e as transformações de fase associadas à temperatura (MUNHOZ, 2017).

Figura 13 - Diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono.



Fonte: Guessier, 2009.

### 3.7.1 Ferro Fundido Cinzento

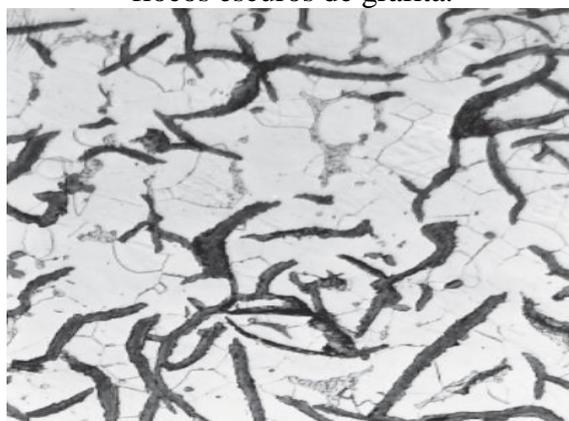
Os ferros fundidos cinzentos são, dentre os ferros fundidos, a liga mais utilizada, devido a sua fácil fusão e moldagem, boa resistência mecânica, boa resistência ao desgaste, boa capacidade de amortecimento e boa usinabilidade. Tem esse nome devido

à sua fratura apresentar uma coloração escura, já que é composto fundamentalmente por carbono e silício (CHIAVERINI, 1996).

A composição química de ferros fundidos cinzentos pode variar amplamente, com teores de carbono e silício entre 2,5% e 4%, e entre 1% a 3% respectivamente. Outros elementos de liga adicionais são presentes em menores quantidades, como manganês (de 0,2% a 1%), fósforo (de 0,02% a 1%), e enxofre (entre 0,02% a 0,25%) (CALLISTER, 2006; CHIAVERINI, 1996).

O principal fator a se destacar na microestrutura de um ferro fundido cinzento, ilustrada na Figura 14, é a presença de uma parcela grande de carbono livre na forma de grafita, que por sua vez se faz presente na forma de flocos; e se encontra circundada pela matriz formada por perlita e ferrita. A presença da grafita faz com que o ferro fundido cinzento seja relativamente frágil quando submetido à tração, já que as extremidades finas dos flocos servem como concentradores de tensão quando uma tensão de tração é aplicada (ELORZ; GONZÁLEZ; VERDEJA, 2018; CALLISTER, 2006; CHIAVERINI, 1996).

Figura 14 - Microestrutura típica de um ferro fundido cinzento, com destaque para os flocos escuros de grafita.

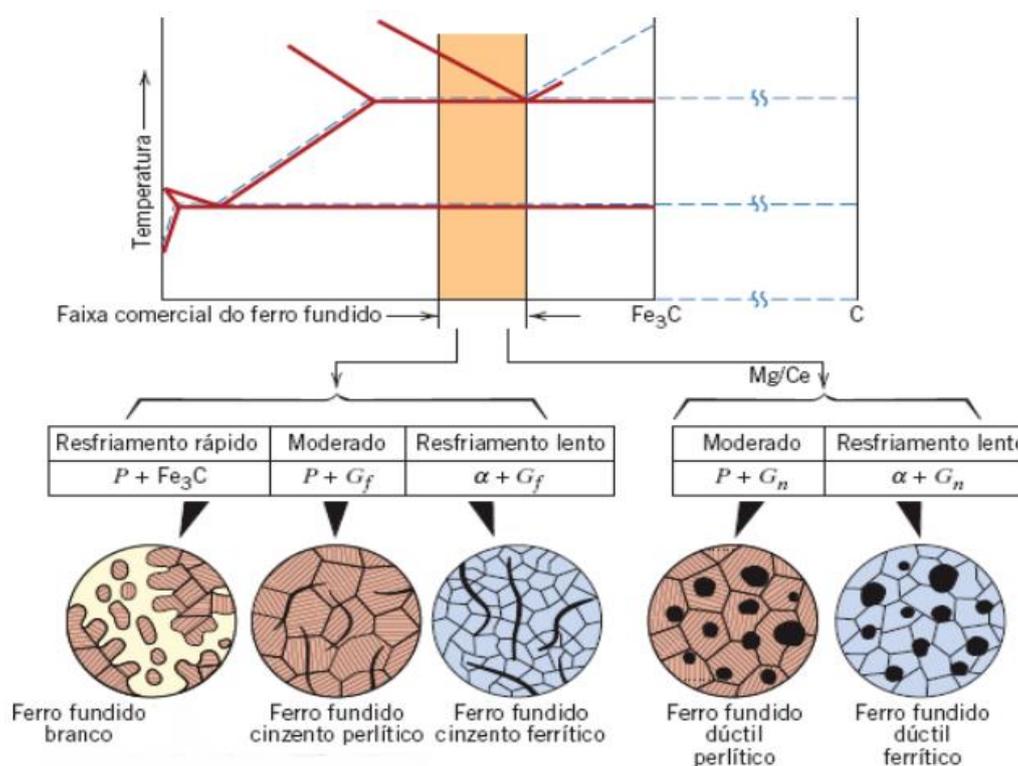


Fonte: Callister, 2006.

Um outro fator que influi sobre a formação da microestrutura de ferros fundidos cinzentos é a velocidade de resfriamento no interior de moldes ao serem processados. A formação de ferros fundidos cinzentos ocorre a partir de velocidades de resfriamento baixas o suficiente para que haja tempo para a decomposição da cementita. A Figura 15 a seguir ilustra essa relação entre velocidade de resfriamento e estrutura resultante, além de representar as microestruturas em questão.

A classificação dos ferros fundidos segundo a ASTM e a norma alemã DIN relaciona o limite de resistência a tração ( $\text{lb/pol}^2$ ) e ( $\text{kgf/mm}^2$ ), respectivamente, à classe correspondente. Já pelo sistema ABNT, os ferros fundidos cinzentos são denominados FC acompanhado do limite mínimo de resistência à tração (CHIAVERINI, 1996). Isto é, FC200 indica um ferro fundido cinzento cujo limite mínimo de resistência a tração é de  $200 \text{ kgf/mm}^2$ .

Figura 15 - Relação entre composição, velocidade de resfriamento e microestrutura de ferros fundidos, onde P é Perlita; Gf é grafita em flocos e Gn é grafita em nódulos.



Fonte: Callister, 2006 (Adaptada pelo Autor).

### 3.8 FUNDIÇÃO DE CARÇAÇAS DE MOTORES ELÉTRICOS

A indústria de fundição de materiais ferrosos é caracterizada pela transformação de sucata em ligas metálicas como o ferro fundido. Nesse processo inclui-se resumidamente seis etapas: (1) obtenção da matéria-prima, por meio de minérios ou sucatas ferrosas, (2) fusão, (3) moldagem, (4) vazamento, (5) desmoldagem e (6) rebarbação e limpeza (BUENO; TONIAL, 2021).

O processo inicia-se com a obtenção da matéria-prima metálica, uma mistura de ferro fundido + sucata de aço, este segundo elemento possui tamanhos e formas diferentes, pois depende da origem da sucata (motores pós-consumo, retornos de processos internos como: pontas de eixos, chapas de estampagem, etc.) devido a isso ele passa por processo de trituração para atingir formas menores e tornar o material mais homogêneo como mostrado na Figura 16. A fundição faz uso de grandes quantidades de sucata metálica, sendo esse um aspecto bastante positivo desta roda de fabricação sob o ponto de vista e otimização e o uso de recursos naturais por meio da reciclagem (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA; 2013).

Segundo Reckziegel *apud* Gunn (2012) a sucata é o insumo empregado em maior quantidade e com grande valor agregado. É de interesse que ela chegue ao forno com um baixo nível de impurezas e dimensões adequadas para evitar a ocorrência de interrupções no processo de fusão, como as causadas por sucata com dimensão acima do especificado e baixa densidade o que induz ao maior consumo de energia no processo. Caso o volume carregado ultrapasse a borda, o fechamento da abóbada – tampa superior do forno – fica prejudicado, e o tempo gasto para retirada da sucata excedente é contabilizado como interrupção.

Figura 16 - Sucata metálica (aço e ferro fundido) após o processo de trituração.



Fonte: Autora, 2021.

Após a obtenção da matéria-prima triturada em tamanhos mais homogêneos, elas estão adequadas para serem levadas em forno com aquecimento elétrico para a fusão do material. Antes é feita a homogeneização do material e ajuste da composição adequada. Na fase de fusão (2), o metal é fundido em um forno de indução. As variáveis mais

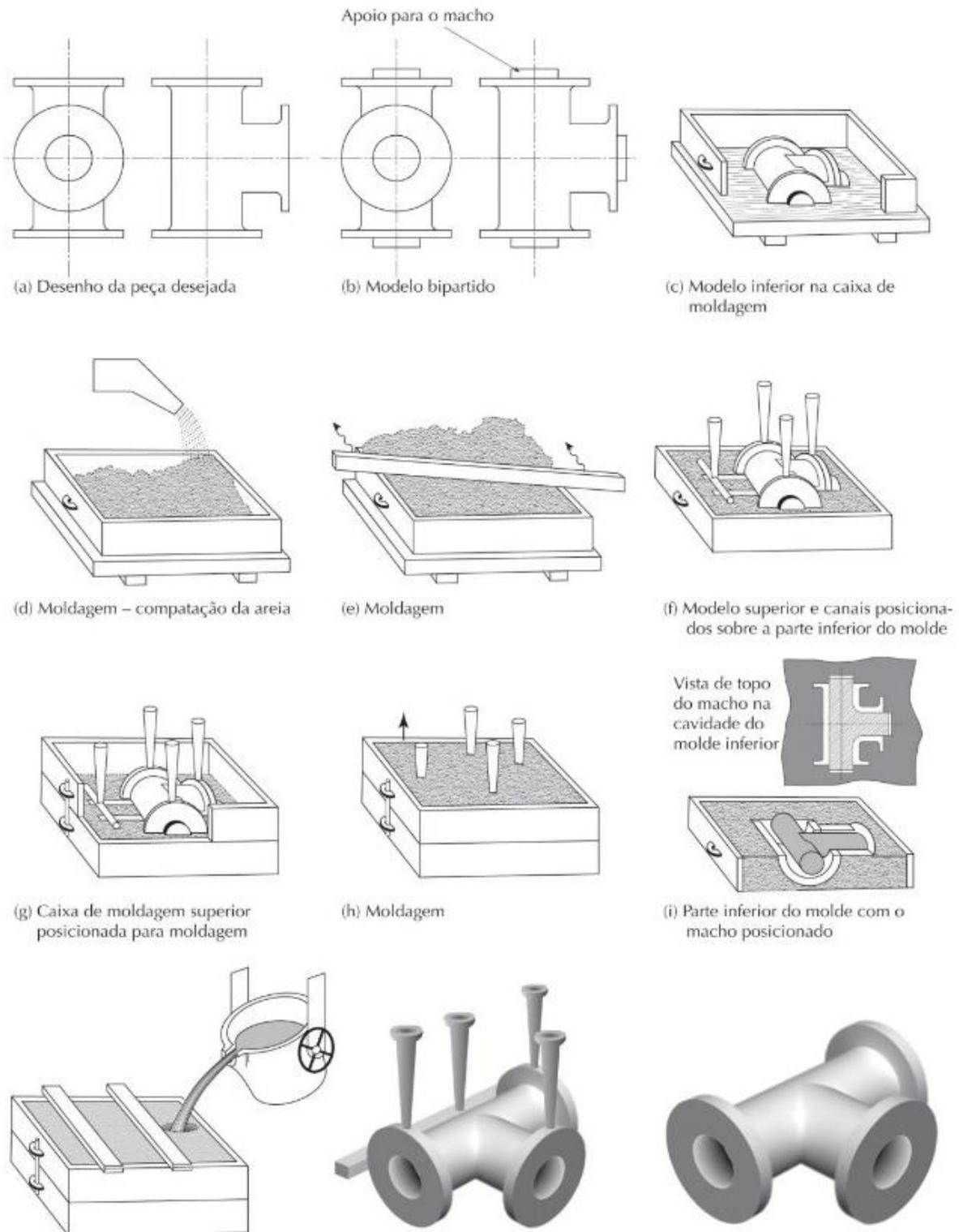
importantes desse processo são a temperatura do forno, - na empresa avaliada é usado aproximadamente 1220°C- a composição química do fundido e a correção da composição, caso necessário (CASOTTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011).

A composição química deve ser rigorosamente controlada pois a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades da peça dependem tanto do processamento como da composição química da mistura. O uso intenso de sucata torna essa questão de controle de composição química crítica e muitas vezes, custosas, tornando rotineiro os procedimentos que envolvem a análise química de amostras de metal fundido antes do vazamento, utilizando técnicas como espectroscopia de emissão ótica ou de raio-X (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

O molde é o dispositivo no qual o metal fundido é despejado e cuja cavidade tem formato similar ao da peça final. Feito em material refratário, o molde deve ser capaz de resistir às altas temperaturas dos metais líquidos. Em alguns casos, o modelo é composto de duas metades, que, unidas, têm o formato da peça. A primeira metade é fixada a uma placa metálica, que é então aquecida e revestida com desmoldante (ex.: silicone). A placa junto ao modelo é posta no fundo de uma caixa, que é então preenchida com areia de moldagem. O conjunto é rodado em torno do seu eixo horizontal em 180°, de modo que a placa e o modelo passam para a superfície, sendo facilmente retirados. Ao fim desse processo, tem-se uma caixa com a areia no formato externo da metade da peça que se pretende fabricar. Esse é o meio-molde da peça. O mesmo deve ser feito com a outra metade (CASOTTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011).

Durante a etapa de moldagem (3) deve ser estudado a necessidade e a localização adequada dos machos. Os machos são colocados nos moldes antes que estes sejam fechados para receber o metal líquido. Diferentemente do molde, que é uma peça em areia que delimita as partes externas da peça fundida, o macho é uma peça em areia que delimita as partes internas (vazios). Durante o vazamento, o macho fica completamente envolto em metal líquido. Deve-se, portanto, considerar a capacidade de dissipação dos gases de queima da resina que aglomera a areia do macho (CASOTTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011). Na Figura 17 estão representadas as etapas do processo de fundição em areia verde, que é usado para confecção dos moldes de carcaças de motores elétricos.

Figura 17 - Representação da sequência de operações na fundição em areia compactada em caixa.



Fonte: Kiminami; Castro; Oliveira, 2013.

No vazamento (4) o metal líquido é transferido do forno para a panela de vazamento, que despejará o metal no molde. As principais variáveis nessa fase são a limpeza da panela, a temperatura e a velocidade de vazamento. Uma velocidade muito alta pode provocar erosão da areia e inclusão de grãos na peça (CASOTTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011). Quando o metal fundido é vazado na cavidade do molde, ele deve preencher todas as partes da cavidade antes de se solidificar. Caso isso não ocorra, a peça fundida será incompleta (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013). O vazamento do metal do molde pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Processo de vazamento do metal.



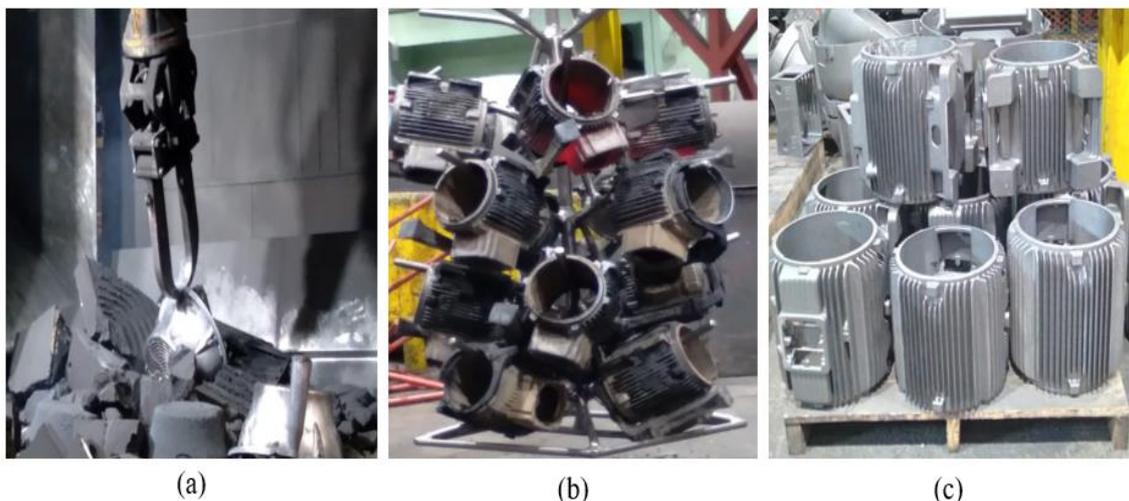
Fonte: Autora, 2021

A desmoldagem (5) é a operação de retirada da peça sólida de dentro do molde. É importante controlar a temperatura em que a operação é feita, para evitar choque térmico e consequentes trincas na peça (CASOTTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011). Após o resfriamento do molde e a solidificação da peça, o molde é levado até uma plataforma vibratória, onde o molde é quebrado e a peça é libertada realizando assim a desmoldagem da carcaça do motor, essa etapa é apresentada nas Figuras 19a.

A última etapa é a de rebarbação e limpeza (6), após o corte dos canais e massalotes, essas áreas precisam de acabamento superficial. É necessária a retirada de incrustações de areia do molde na peça fundida, mostrada na Figura 19b. Essa limpeza é feita, em geral, com jatos abrasivos (CASOTTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011).

Posteriormente são removidas as imperfeições (rebarbas, aparas, etc.) da carcaça, após isso tem-se uma peça final sem imperfeições estéticas, como mostrado na Figura 19c.

Figura 19 - (a) Desmoldagem da carcaça, (b) Carcaças com incrustações de areia após a desmoldagem, (c) Carcaças após o processo de jateamento de areia e rebarbação manual.



Fonte: Autora, 2022.

As emissões provenientes da fundição são gasosas, sólidas e líquidas. No âmbito das emissões de gases, destacam-se os gases:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  e compostos de flúor, e eventuais emissões de formaldeídos, fenóis, amoníaco, aminas, compostos de cianetos, e hidrocarbonetos aromáticos gerados durante o processo de fundição e na preparação dos moldes de areia. Já os principais resíduos sólidos encontrados no processo de fundição são a areia de fundição e a escória. Destaca-se entre esses resíduos a areia de fundição, que é um dos principais e gerado em maior quantidade e, desta forma, a areia de fundição é um resíduo que geralmente é destinado aos aterros industriais. Para a parcela de efluentes gerados, existem principalmente as águas residuais e lodo (geradas no lavador de gases, refrigeração). Na fundição é primordial que o forno permaneça com a sua temperatura elevada e, por conta disso, muita energia é empregada nesse processo. Manter um forno com a temperatura ideal pode consumir muita energia elétrica ou muito combustível para queima, ambos os quais são grandes emissores de GEE. Posteriormente, neste documento, são abordadas de forma mais detalhada todas as emissões e resíduos desse processo cujas as informações disponíveis permitam.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Essa seção tem o propósito de abordar as etapas envolvidas na realização deste trabalho, abrangendo o levantamento de dados, triagem e metodologia utilizada. A quantificação das emissões envolvidas no processo de fundição de carcaças será feita com base na metodologia do *GHG Protocol*, que é mundialmente utilizada para estimar a quantidade de GEE. As informações quantitativas foram levantadas pela autora consultando registros internos da empresa avaliada, selecionando e identificando as variáveis importantes para realização dos cálculos com base na metodologia citada.

### 4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais avaliados neste trabalho foram carcaças de motores elétricos de diversos tamanhos e com diferentes aplicações, podendo ser elas comerciais ou industriais. Ambas são produzidas pela mesma fundição, situada na região norte do estado de Santa Catarina, que utiliza a mesma matéria-prima e processo na fabricação destas carcaças, diferindo apenas no formato e na quantidade de material empregado. Segundo o fabricante, a carcaça para fabricação desses motores é composta de ferro fundido e normalmente é fabricada quase que integralmente de matéria-prima reciclada, oriunda dos:

- Próprios processos (ex.: usinagem, estamparia, etc.);
- Empresas de reciclagem de materiais metálicos locais;
- Revendas de motores elétricos usados;

Foram avaliados em três distintos cenários para o cálculo das emissões geradas no processo de fundição de carcaças metálicas: uso de 100% de sucata metálica (cenário 1), uso de 100% material metálico virgem (cenário 2) e uso de 50% sucata metálica e 50% material metálico virgem (cenário 3), como mostrado na Tabela 4.

Os dados utilizados na análise do cenário 1 foram obtidos através de uma base de dados fornecida pela empresa. O cenário 2 é um cenário hipotético, visto que a empresa não realiza a fundição de carcaças apenas com 100% de material metálico virgem. Note que os dados para o cenário 3 são, na verdade, uma combinação proporcional dos cenários 1 e 2.

Tabela 4 - Cenários da composição de carcaças de motores elétricos avaliados.

Cenários	Ferro fundido virgem (%)	Sucata metálica (%)
1	0	100
2	100	0
3	50	50

Fonte: Autora, 2021.

#### 4.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO DAS EMISSÕES GEE

Para cálculo dos GEEs gerados no processo de produção de carcaças de motores elétricos de ferro fundido cinzento foram utilizadas as metodologias de cálculos do *GHG Protocol* e *GHG Protocol Brasil*. Como sugere a metodologia, as emissões são subdivididas em escopo. Conforme citado na seção 3.2.1 o índice padrão das emissões de GEE é o carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e), que compila as emissões gerada por diversos gases em um único indicador. Para o cálculo do CO<sub>2</sub>e será utilizado a Equação 2 apresentada abaixo.

$$ECO_{2e} = \sum GWP \times E_{GEE} \quad (2)$$

Onde:

$ECO_{2e}$  = Emissões de CO<sub>2</sub>e

$GWP$  = Potencial de aquecimento global

$E_{GEE}$  = Emissão do gás de efeito estufa

O uso da equação descrita acima se faz necessário das informações do potencial de aquecimento global ou *Global Warming Potential* (GWP) de cada gás, apresentados na Tabela 5. A Tabela 5 inclui os principais gases internacionalmente reconhecidos como gases de efeito estufa regulados pelo Protocolo de Quioto.

Um fato a ser pontuado, é que os fatores de emissão reportados pelas instituições regulamentadoras não consideram as emissões individuais geradas de cada gás um determinado processo. Normalmente é reportado o valor de CO<sub>2</sub>e (este englobando todos os gases gerados), ou são apenas indicados os gases que possuem maiores gerações durante o processo. Os fatores que consideram os gases de maneira individual evoluem

os seguintes gases: CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> - exceto quando se trata de emissões geradas por gases refrigerantes-.

Tabela 5 - Valores do GWP para os principais gases de efeito estufa.

Gás	Família	GWP
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )		1
Metano (CH <sub>4</sub> )		25
Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	-	298
Trifluoreto de nitrogênio (NF <sub>3</sub> )		17200
Hexafluoreto de enxofre (SF <sub>6</sub> )		22800
HFC-23 (CHF <sub>3</sub> )		15800
HFC-32 (CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )		675
HFC-41(CH <sub>3</sub> F)		92
HFC-125(C <sub>2</sub> HF <sub>5</sub> )		3500
HFC-134 (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub> )	Hidrofluorcarbonos (HFC's)	1100
HFC-134a (CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub> )		1430
HFC-152a (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> F <sub>2</sub> )		12
HFC-143a (C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> F <sub>3</sub> )		4470
PFC-14 Perfluormetano (CF <sub>4</sub> )		7930
PFC-116 Perfluoretano (C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> )	Perfluorcarbonos (PFCs)	12200
PFC-218 Perfluorpropano (C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> )		8830

Fonte: GVCESb, 2016.

#### 4.1.1 Metodologia de cálculo para o Escopo 1

No Escopo 1 são contabilizadas as emissões diretas geradas pelas operações da própria empresa. Com base no que foi exposto na Tabela 1 (seção 3.4.1), onde são apresentadas todas as categorias do Escopo 1 para o cálculo de emissões de GEE, definem-se como pertencentes ao processo de produção de carcaças e de controle interno da empresa as seguintes categorias:

- Combustão móvel;

- Processos industriais;
- Fugitivas;

#### 4.1.1.1 Combustão móvel

A categoria 2 do *GHG Protocol* Brasil estima as emissões de GEE da combustão móvel. Essas emissões são geradas pela combustão de combustível, e energia produzida na combustão é usada para percorrer uma distância. A quantificação das emissões pode ser feita através da Equação 3. Os fatores ( $fc$ ) usados para o cálculo das emissões geradas pela combustão do GLP são apresentados na Tabela 6.

$$E_{cm} = \sum qc \times fc \quad (3)$$

Onde:

$E_{cm}$  = Emissões geradas pela combustão móvel (tGEE)

$qc$  = Quantidade de combustível comprada (kg)

$fc$  = Fator de emissão do combustível (tGEE/kg)

Tabela 6 - Fator de emissão ( $fc$ ) para combustão do GLP.

Combustível	CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /kg)	CH <sub>4</sub> (kg CH <sub>4</sub> /kg)	N <sub>2</sub> O (kg N <sub>2</sub> O/kg)
GLP	2,932	0,0029	0,00001

Fonte: Adaptado de MME, 2020.

A Equação 3 será usada apenas para avaliar a emissão de combustível usado nas empilhadeiras. O fator de emissão  $fc$  das empilhadeiras pode ser visto na Tabela 6. Já para estimar a quantidade de combustível usado durante o ano, a Equação 4 deve ser utilizada

$$qc = \sum mc \times qe \times du \quad (4)$$

Onde:

$qc$  = Quantidade total de combustível usada (kg/ano)

$mc$  = Média diária de combustível usada (kg)

$qe$  = Quantidade de empilhadeiras

$du$  = Quantidade de dias úteis do ano

#### 4.1.1.2 Processos industriais

A categoria 3 refere-se às emissões de GEE que são produzidas por uma variedade de atividades industriais que não são relacionados à energia. As principais fontes de emissão são os processos de produção industrial que transformam quimicamente ou fisicamente os materiais, tais como as emissões de CO<sub>2</sub> da calcinação na fabricação de cimento, as emissões de CO<sub>2</sub> da quebra catalítica no processamento petroquímico, as emissões de PFCs da fundição do alumínio (GCVESa, 2016; IPCCa, 2016). Para estimar as emissões geradas pelos processos industriais, é usada a Equação 5:

$$E_{pi} = \sum mp \times fpi \quad (5)$$

Onde:

$E_{pi}$  = Emissões geradas pelos processos industriais (tGEE)

$mp$  = Consumo de matéria-prima (t)

$fpi$  = Fator de emissão do processo industrial (tGEE/t)

Em alguns casos as emissões do processo industrial são produzidas em combinação com as emissões da combustão de combustíveis, dificultando a classificação destas entre a categoria de energia – Escopo 2 - ou a categoria de processos industriais – Escopo 1-. Quando o objetivo principal de efetuar a combustão do combustível é usar o calor liberado, essas emissões devem ser inseridas na categoria de energia e não nos processos industriais. Existem, no entanto, alguns processos químicos ou etapas de processos que oxidam o carbono como matéria-prima e são exotérmicos. A redução de ferro em um alto-forno através da combustão de coque é um exemplo, visto que o calor liberado é utilizado dentro dos processos ou para outras necessidades energéticas do produtor. No entanto, neste caso, o objetivo principal da oxidação do coque é produzir ferro-gusa (IPCCa, 2016). O coque desempenha dois papéis importantes nesse processo: o fornecimento de calor (térmico) e a atuação como fonte de carbono, provocando a redução direta e indireta do minério de ferro (papel químico) e, por conta disso, o coque é tratado como uma emissão gerada de processo industrial. De modo geral, essas emissões

decorrem dos processos produtivos das indústrias, porém, não resultam da queima de combustíveis (GCVESa, 2016a). Exemplos:

- Produtos minerais: produção de cimento, cal, vidro, barrilha, magnésio, produtos da indústria siderúrgica, etc.
- Indústria química: produção de amônia, ácido nítrico, ácido adípico, ácido fosfórico, etc.
- Indústria metalúrgica: processo de redução do minério de ferro, processos da indústria do alumínio, etc.

As transformações químicas ou físicas de materiais, esta categoria engloba majoritariamente de processos primários de transformação, realizados pelas indústrias de base aquelas que transformam matéria-prima bruta em um produto intermediário para outras indústrias de transformação. Como a empresa avaliada é uma indústria de transformação, que compra matéria-prima já na sua forma intermediária de ferro fundido, não há geração de emissões para essa categoria. As emissões geradas nesta categoria são adicionadas no fator de emissão da matéria-prima (usadas na categoria 1 do Escopo 3), pois são geradas pela indústria de base. As emissões geradas nos Escopos 1 e 2 dos fornecedores de matéria-prima serão apontados no Escopo 3 da empresa compradora. Devido a isso, essa categoria será contabilizada como zero.

Caso a empresa avaliada compre minério de ferro para transformá-lo em ferro-gusa, para posteriormente produzir um subproduto como ferro fundido ou aço, segundo o IPPCa (2016), seria gerado uma emissão pelo processo industrial de 1,35 tCO<sub>2</sub>/t de ferro-gusa, sendo que este fator exclui os outros gases gerados no processo de transformação (minério de ferro – ferro-gusa) como CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>.

Destaca-se que um ponto ser melhorado na metodologia, a ser adotado por parte dos órgãos regulamentadores de emissões, é um melhor esclarecimento de como contabilizar as possíveis emissões de processos industriais oriundas de transformações secundárias, que é o caso da indústria de fundição.

#### 4.1.1.3 Emissões fugitivas

A categoria 5 do *GHG Protocol* Brasil estima as emissões de GEE fugitivas, que são emissões que não ocorrem de maneira intencionais, mas sim pelo vazamento de

escape oriundo do processo de envase, distribuição ou armazenamento de gases. As emissões fugitivas podem ocorrer nos seguintes produtos: extintores de incêndio, equipamentos de refrigeração, ar-condicionado e tubulações de gás. A Equação 6 pode ser usada para estimar a quantidade de emissões fugitivas geradas por extintores, que é o caso aqui abordado.

$$E_{ex} = \sum c \times tv \times qex \quad (6)$$

Onde:

$E_{ex}$  = Emissões geradas pelos extintores (tGEE)

$c$  = Capacidade do extintor

$tv$  = Taxa de vazamento

$qex$  = Quantidade de extintores

O documento emitido pelo IPCC (2006b) determina que, em média, 15% do conteúdo de um extintor de incêndio vaza ao ano, ao passo que outros 11% são utilizados em serviço. Dessa forma, aqui, considera-se que 26% de um extintor de incêndio é utilizado ao ano.

#### **4.1.2 Metodologia de cálculo para o Escopo 2**

O Escopo 2 contabiliza as emissões de GEE da geração da eletricidade comprada e consumida pela empresa. A eletricidade comprada é usada para manter a iluminação da instalação, funcionamento das máquinas e principalmente o aquecimento do forno para fusão dos metais que gera o maior percentual de consumo.

Para o cálculo das emissões utilizou-se da metodologia de cálculo do Programa Brasileiro do GHG *Protocol*, onde o método escolhido foi o método baseado na localização, que implica no uso de fatores de emissão que representam as emissões médias da geração de energia dentro de um território geográfico (ex.: país, estado, continente) e um período de tempo definido (ex.: anual, trimestral, etc.). Na Equação 7 é apresentado o método de cálculo com base na localização do Programa Brasileiro do GHG *Protocol*.

$$E_e = \sum fe \times Ce \quad (7)$$

Onde:

$E_e$  = Emissões do consumo de eletricidade (tGEE)

$fe$  = Fator de emissão do Sistema Interligado Nacional (tGEE/MWh)

$Ce$  = Consumo de energia elétrica mensal (MWh)

Para estimar as emissões de GEE do Cenário 1 geradas na compra da energia é preciso realizar a obtenção dos dados primários do consumo de energia do ano de 2020 do processo de fundição de carcaças dos motores. Esses dados foram obtidos do sistema de gerenciamento integrado da empresa, e mapeados pelo departamento onde ocorre a fundição dos motores, garantindo, assim, que os dados de consumo de energia usada representem apenas o que é usado para fundição da carcaça dos motores e não na empresa como um todo. Como o consumo de energia é diferente para produção de carcaças com sucata e material metálico virgem, ambos os cenários estudados apresentam consumos diferentes.

Para o cenário 2 (100% de ferro fundido virgem) será usado um dado teórico, pois se trata de um cenário hipotético, não efetuado pela empresa. Nesse caso foi consultado o banco de dados de um software de Seleção de Materiais com licença disponível na Universidade Federal de Santa Catarina. Esse software indica que a energia usada para a fundição do ferro fundido cinzento é em torno de 10,1 - 11,1 MJ/kg, isto é, uma média de 10,6 MJ/kg.

A Equação 8 é usada para estimar o consumo do cenário 2, com base nos dados obtidos.

$$E_c = \sum cet \times fce \times mp \quad (8)$$

Onde:

$E_c$  = Energia consumida mensalmente do cenário 2 (kWh)

$cet$  = Consumo de energia teórico para fundição de ferro fundido (MJ/kg)

$fce$  = Fator de conversão de energia de 0,2778 (kWh/MJ)

$mp$  = Consumo de matéria-prima (kg)

No Brasil os fatores de emissão de GEE médios mensais da geração de energia no ano de 2020 são apresentados em percentuais de CO<sub>2</sub>, excluído os demais gases reportados na Tabela 5. Na Tabela 7, são apresentados esses fatores que foram retirados dos relatórios anuais do Sistema Interligado Nacional do Brasil (SIN). No Brasil a emissão média anual de CO<sub>2</sub> para a geração de energia é de aproximadamente 0,0617 tCO<sub>2</sub>/MWh, como o valor de GWP do CO<sub>2</sub> é 1, o valor do fator de CO<sub>2</sub> é o mesmo.

Tabela 7 - Fatores médios mensais de CO<sub>2</sub> da produção de energia no Brasil.

Mês	Fator de emissão de CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> /MWh)
Janeiro	0,0916
Fevereiro	0,0558
Março	0,0384
Abril	0,0296
Mai	0,0358
Junho	0,0491
Julho	0,0400
Agosto	0,0414
Setembro	0,0329
Outubro	0,0961
Novembro	0,1191
Dezembro	0,1109

Fonte: SIN, 2020.

#### 4.1.3 Metodologia de cálculo para o Escopo 3

Já para a quantificação de GEE do Escopo 3, existe o documento base a ser utilizado, conhecido como *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions* (2013), além das revisões técnicas do Programa Brasileiro *GHG Protocol*. Este trabalho apenas refere-se à quantidade de GEE produzido na fabricação de uma carcaça de ferro fundido, que é um produto intermediário de um motor. Devido a isso, não são todas as quinze categorias de Escopo 3 (apresentadas anteriormente na Tabela 2) que serão consideradas, pois para algumas delas não há emissão de GEE. As categorias do *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions* que serão consideradas para cálculo são:

- Categoria 1: Bens e serviços adquiridos;
- Categoria 4: Transporte e distribuição *upstream* (do berço ao portão);
- Categoria 5: Resíduos gerados nas operações;
- Categoria 7: Deslocamento casa-trabalho;

#### 4.1.3.1 Bens e serviços adquiridos

A categoria 1 representa os bens e serviços adquiridos pela empresa e nesta categoria podem-se incluir as emissões de GEE geradas pela compra de insumos usados na produção: matéria-prima, componentes e peças. Neste trabalho, a categoria 1 será usada para estimar as emissões de GEE geradas na compra de matéria-prima para produção das carcaças. O *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions* (2013) sugere diferentes metodologias sendo uma delas o método de dados médios, apresentado na Equação 9.

$$E_{mt} = \sum mp \times fmp \quad (9)$$

Onde:

$E_{mt}$  = Emissões da compra de matéria-prima (tGEE)

$mp$  = Consumo de matéria-prima (t)

$fmp$  = Fator de emissão da matéria-prima (tGEE/t)

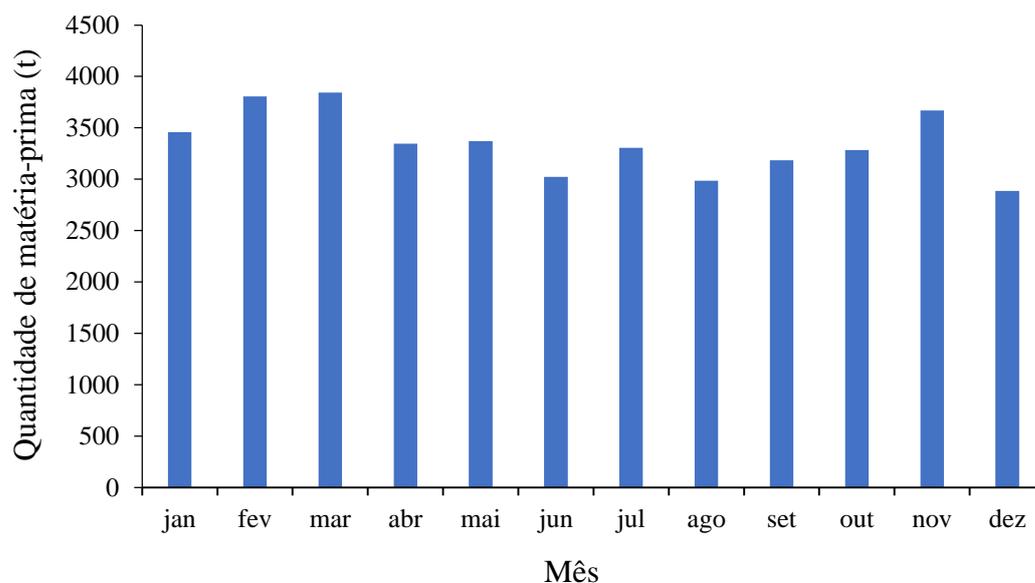
As informações referentes ao consumo de matéria-prima ( $mp$ ) para cálculo de quantificação de emissões referentes à compra de matéria-prima foram retiradas do sistema integrado de emissões fiscais tributárias e controle de estoque da empresa. Essas informações foram selecionadas para representar o consumo de matéria-prima referente ao ano de 2020 na fundição de carcaças. Esses dados estão presentes no Figura 20.

Para o cenário 1, 2 e 3 o consumo de matéria-prima (toneladas) no processo de fundição será o mesmo, mas isso não significa que não haverá alteração nas emissões de GEE no comparativo. Para fins de cálculo, o rendimento de ambos materiais é considerado igual, conforme os dados técnicos informados pela empresa.

É importante ressaltar que os materiais possuem diferentes fatores, sendo que o material metálico virgem apresenta o fator 2,357 kgCO<sub>2</sub>e/kg e a sucata apresenta o fator

0,669 kgCO<sub>2</sub>e/kg. O fator para o uso de material virgem engloba todo o processo de extração, processamento primário até o produto final usado: o ferro fundido cinzento. Como a sucata não engloba esses processos, seu fator é menor. Os fatores mostrados aqui foram obtidos através do banco de dados do software de Seleção de Materiais.

Figura 20 - Consumo de matéria-prima/mês para os cenários 1, 2 e 3.



Fonte: Autora, 2021.

#### 4.1.3.2 Transporte e Distribuição *Upstream* (do berço ao portão)

A categoria 4 é usada para estimar as emissões do transporte e distribuição de produtos, em geral adquiridos pela empresa de fornecedores de bens (ex.: materiais, peças, componentes, etc.) ou serviços, onde os veículos de transporte são operados pelos fornecedores ou transportadoras, ou seja, veículos não operados ou pertencentes a empresa.

Essa categoria será usada para estimar o transporte de matéria-prima tanto para sucata metálica quanto para o material metálico virgem. Um dos métodos que pode ser usado para o cálculo é o método baseado na distância apresentada na Equação 10.

$$E_t = \sum mp \times d \times ft \quad (10)$$

Onde:

$E_t$  = Emissões de transporte (tGEE)

$mp$  = Consumo de matéria-prima (t)

$d$  = Distância percorrida no trecho de transporte (km)

$ft$  = Fator de emissão do modo de transporte ou tipo de veículo (tGEE/t.km)

No Brasil, alguns combustíveis fósseis têm um percentual de biocombustível incorporado antes da venda ao consumidor final. A Lei nº 13.263/2016 permite que um percentual entre 11% e 15% de biodiesel seja inserido no combustível diesel. Por conta da mistura de combustíveis, é necessário realizar uma ponderação das emissões de GEE de acordo com a quantidade de combustível gasto. Aqui, especificamente no ano de 2020, o percentual de biodiesel é considerado como 11%, isto é, a média anual. Dessa forma a Equação 10 é alterada, de tal forma que o novo método de cálculo pode ser visto na Equação 11. Essa equação é utilizada para o cálculo das emissões de GEE para o combustível diesel. No caso do biodiesel a Equação 12 deve ser utilizada. Destaca-se que na Equação 12 o fator utilizado deve ser o do biodiesel.

$$E_T = \sum mp \times d \times ft \times (1 - pm) \quad (11)$$

$$E_T = \sum mp \times d \times ft \times pm \quad (12)$$

Onde:

$pm$  = Percentual de mistura do biodiesel no diesel

Os fatores de emissão de transporte já incorporam o consumo médio de combustível, tamanho médio, massa dos veículos e suas emissões de GEE associadas. No caso do transporte de matéria-prima para produção de carcaças metálicas, este normalmente ocorre através do modal rodoviário em caminhões de médio porte, que transportam entre 3,5 a 7,5 toneladas, movidos a óleo diesel. Para esse tipo de veículo, a *Department for Environment Food Rural Affairs* (DEFRA) estabelece para o ano de 2020 os seguintes fatores de emissão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Fator de emissão dos combustíveis para caminhões de porte médio a diesel no ano de 2020.

Combustível	CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /t.km)	CH <sub>4</sub> (kgCH <sub>4</sub> / t.km)	N <sub>2</sub> O (kgN <sub>2</sub> O/t.km)
Diesel	0,109	0,000006	0,000006
Biodiesel	0,102	0,000014	0,000001

Fonte: Adaptado de DEFRA, 2020.

#### 4.1.3.3 Resíduos e efluentes gerados nas operações

A categoria 5 do *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions* (2013) engloba as emissões geradas do descarte tanto de resíduos sólidos quanto de efluentes. São considerados resíduos sólidos e efluentes aqueles cujo o descarte não é propriedade ou operado pela empresa, mas sim por terceiros. A categoria 5 considera todas as emissões que ocorrem durante o processo de tratamento e/ou disposição final do resíduo ou efluente.

As emissões geradas do descarte dos efluentes são principalmente resíduos biológicos e água residuais de equipamentos como lavador de gases e torre de resfriamento. A emissão gerada pela água pode ser calculada através da Equação 13.

$$E_e = \sum v \times dbo \times fte \quad (13)$$

Onde:

$E_e$  = Emissões gerada pelo tratamento efluente (tGEE)

$v$  = Volume do efluente consumido (m<sup>3</sup>)

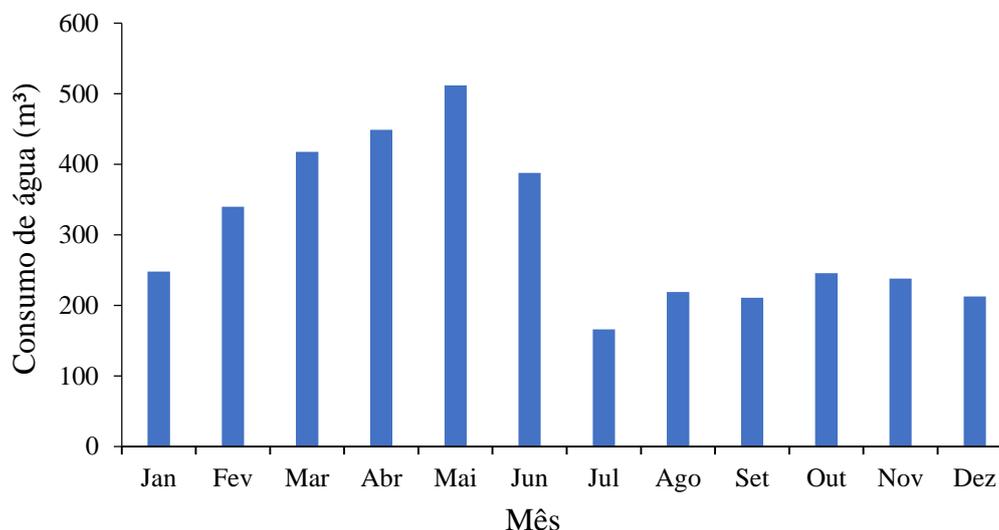
$dbo$  = Demanda bioquímica de oxigênio (tDBO/m<sup>3</sup>)

$fte$  = Fator de emissão por tipo de tratamento do efluente (tGEE/tDBO)

O consumo de água mensal foi obtido através de faturas de consumo mensal, do medidor individual do departamento de fundição, representando assim o consumo real, visível na Figura 21. Como o consumo de água não está relacionado diretamente com o processo de produção de carcaças, os cenários 1, 2 e 3 são tidos como iguais. Por outro lado, os fatores de emissão, que dizem respeito ao cálculo da emissão de GEE para

tratamento de efluentes, foram obtidos através do documento emitido pelo IPCC (2006c) e estão disponíveis na Tabela 9. O tipo de tratamento de efluente e demanda bioquímica de oxigênio adotado pela empresa que realiza o processo foi o tratamento de lagoa anaeróbia e 350 mgDBO/l, respectivamente.

Figura 21 - Consumo de água para o tratamento de efluentes para os cenários 1, 2 e 3.



Fonte: Autora, 2021.

Tabela 9 - Fator de emissão para o tratamento de efluentes.

Tratamento	CH <sub>4</sub> (kgCH <sub>4</sub> /kgDBO)	N <sub>2</sub> O (kgN <sub>2</sub> O/kgDBO)
Lagoa anaeróbica	0,48	0,007857

Fonte: Adaptado de IPCCc, 2006.

As emissões geradas do descarte de resíduos sólidos podem ser calculadas pelo método disponível na Equação 14, onde as emissões de resíduos (ex.: papelão, resíduos de alimentos e águas residuais) dependem somente do tipo do resíduo e do tratamento e/ou disposição final empregado (ex.: aterro sanitário, reciclagem, incineração, compostagem, etc.). Assim, para os efluentes, são apenas considerados os resíduos sólidos oriundos de instalações de propriedade ou controladas por terceiros.

$$E_{RS} = \sum mr \times frs \quad (14)$$

Onde:

$E_{RS}$  = Emissões de GEE dos resíduos sólidos gerados nas operações (tGEE)

$mr$  = Massa de resíduos sólidos produzidos (t)

$frs$  = Fator de médio do tratamento de resíduos sólidos (tGEE/t)

Segundo Kaza et. al (2018) a geração média de resíduos sólidos per capita no Brasil é de 1,142 (kg/pessoa.dia), onde dentre esses estão distribuídos resíduos orgânicos, papel e seus derivados. Para estimar os resíduos sólidos gerados durante o ano de 2020 foi considerada a Equação 15.

$$mr = \sum gpc \times qc \times du \quad (15)$$

Onde:

$mr$  = massa de resíduos sólidos produzidos (t)

$gpc$  = geração média de resíduos sólidos per capita no Brasil (kg/ pessoa.dia)

$du$  = quantidade de dias úteis do ano

$qc$  = quantidade total de colaboradores

O fator de emissão utilizado para cálculo das emissões do tratamento dos resíduos sólidos e o percentual usado para cada resíduo é apresentado na Tabela 10, sendo o fator de emissão uma média dos tratamentos utilizados nesses tipos de resíduos no Brasil.

Tabela 10 - Fator médio de emissão para o tratamento de resíduos sólidos no Brasil.

<b>Resíduo</b>	<b>Distribuição (%)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (kg CH<sub>4</sub>/kg)</b>
Papel	50	0,03
Orgânico	50	0,069

Fonte: Adaptado de Kaza (2018).

#### 4.1.3.4 Deslocamento dos funcionários

A categoria 7 é usada para estimar a emissão do transporte dos colaboradores entre suas residências e seu local de trabalho, tal qual normalmente é feito através de veículos

como: carros, ônibus, metrô, bicicleta e caminhada. Nesta categoria são apenas considerados os modais de transportes que não são pertencentes à empresa ou operados por ela, sendo assim, são considerados apenas transportes terceirizados ou operados pelo próprio colaborador durante seu deslocamento à sua unidade de trabalho. As emissões da parcela de diesel geradas pelo deslocamento por ônibus de funcionários podem ser calculadas pelo método de dados médios exposto na Equação 16. Já as emissões da parcela de biodiesel podem ser obtidas através da Equação 17.

$$E_{do} = \sum nf \times d \times 2 \times pf \times du \times fo \times (1 - pm) \quad (16)$$

$$E_{do} = \sum nf \times d \times 2 \times pf \times du \times fo \times pm \quad (17)$$

Onde:

$E_{do}$  = Emissões de GEE do transporte por ônibus (tGEE)

$nf$  = Número total de funcionários

$pf$  = Percentual de funcionários que usam meio de transporte

$d$  = Distância de deslocamento de ida (km)

$du$  = Dias úteis por ano

$fo$  = Fator de emissão do ônibus (tGEE/passageiro.km)

$pm$  = Percentual de mistura do biodiesel no diesel

Os fatores do biodiesel e diesel para ônibus no ano de 2020 são expressos na Tabela 11. Percebe-se que os fatores são indicados por passageiro (sigla p).

Tabela 11 - Fator de emissão (por passageiro) para frota de ônibus urbano em 2020 por gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O.

Meio de Transporte	Combustível	CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /p.km)	CH <sub>4</sub> (kgCH <sub>4</sub> /p.km)	N <sub>2</sub> O (kgN <sub>2</sub> O/p.km)
Ônibus	Diesel	0,134	0,000007	0,000007
	Biodiesel	0,125	0,00002	0,000001

Fonte: GVCES, 2021

Já para carros e motocicletas, assim como na categoria de transporte e distribuição *upstream* (do berço ao portão), há um percentual de etanol na gasolina que, no ano de 2020, teve uma média de 27% (BRASIL, 2020). Por conta da mistura de combustíveis, é necessário realizar uma ponderação das emissões de GEE de acordo com a quantidade de combustível gasto. Aqui, especificamente no ano de 2020, o percentual de etanol é considerado como 27%.

Nesse caso, ao utilizar a Equação 18, calcula-se a quantidade de GEE emitido pela gasolina presente no combustível. De forma alternativa, para calcular a quantidade de emissões de GEE do etanol, utiliza-se a Equação 19. Os fatores de emissão da gasolina e do etanol estão dispostos na Tabela 12, separados de acordo com os gases de efeito estufa.

$$E_{mc} = \frac{nf \times pf \times d \times 2 \times du \times fc}{kl} \times (1 - pmg) \quad (18)$$

$$E_{mc} = \frac{nf \times pf \times d \times 2 \times du \times fc}{kl} \times pmg \quad (19)$$

Onde:

$E_{mc}$  = Emissões de GEE do transporte por carro ou moto (tGEE)

$nf$  = Número total de funcionários

$pf$  = Percentual de funcionários que usam meio de transporte

$d$  = Distância de deslocamento de ida (km)

$du$  = Dias úteis por ano

$fc$  = Fator de emissão do combustível (tGEE/l)

$kl$  = Média de quilômetros que o veículo percorre com um litro de combustível (km/l)

$pmg$  = Percentual de mistura do etanol na gasolina

Tabela 12 - Fator de emissão dos combustíveis gasolina e etanol para o ano de 2020.

Combustível	CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /l)	CH <sub>4</sub> (kgCH <sub>4</sub> /l)	N <sub>2</sub> O (kgN <sub>2</sub> O/l)
Gasolina	2,212	0,0008	0,00026
Etanol	1,526	0,0002	0,00001

Fonte: MMA, 2014.

Os valores médios de consumo para automóveis e motocicletas são adotados como 10,4 e 37,04 quilômetros por litro, respectivamente, de acordo com o exposto em Ministério do Meio Ambiente (MMA) (2014). Esses valores médios estão relacionados a veículos cujo ano de fabricação é próximo de 2010.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

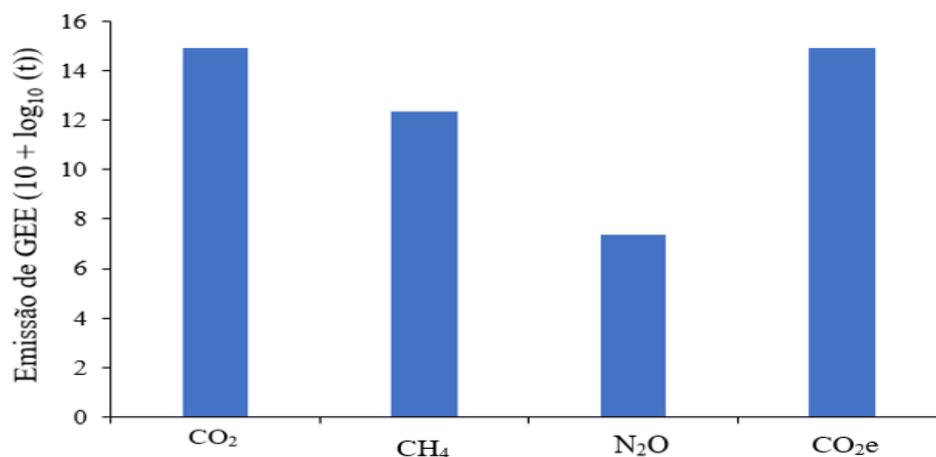
### 5.1 ANÁLISES DAS EMISSÕES DE GEE GERADAS NO ESCOPO 1

#### 5.1.1 Emissões de GEE na combustão móvel

Como visto, essa categoria no cenário avaliado somente reflete o uso das empilhadeiras que transportam as carcaças de um ambiente para outro. Na fundição existem 6 empilhadeiras que realizam o transporte das peças para diversas etapas do processo, e o combustível utilizado por elas é o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). O consumo médio diário dessas empilhadeiras é de 18 kg/dia, conforme informado pela empresa. Utilizando a Equação 4, pode-se estimar o consumo médio anual de GLP utilizado para combustão móvel que é 27.108 kg/ano.

Para calcular as emissões geradas pela combustão do GLP que promove o deslocamento da empilhadeira é usada a Equação 3. Usando essa equação obtém-se os resultados apresentados na Figura 22, que refletem as emissões de combustão móvel geradas na empresa avaliada. O consumo de GPL não varia entre os cenários, pois ele não está diretamente relacionado com o processo de fundição da matéria-prima. Nota-se que para o caso das empilhadeiras, em combustão móvel, a emissão de CO<sub>2</sub> é bastante expressiva, quando comparada com as emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. O cálculo do carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e), que representa as emissões dos três GEE analisados com base em seu potencial de aquecimento global (GWP) é realizado conforme a Equação 2.

Figura 22 - Emissões de GEE geradas pela combustão do GLP para empilhadeiras para os cenários 1, 2 e 3.



Fonte: Autora, 2021.

### 5.1.2 Emissões fugitivas

Para estimar as emissões de GEE fugitivas considerou-se que essas são provenientes dos extintores de incêndio. Essa estimativa de emissões pode ser feita através da Equação 6. Ainda, considera-se que cada extintor possui em média 6 kg de CO<sub>2</sub> e, também, que existem 18 extintores no local avaliado. Como o gás utilizado pelos extintores é CO<sub>2</sub>, as emissões fugitivas geradas em termos de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) são 100% relacionadas ao CO<sub>2</sub>. Como o GWP do CO<sub>2</sub> é 1, as emissões em carbono equivalente são idênticas às do CO<sub>2</sub>. O resultado das emissões de carbono equivalente pode ser visto na Tabela 13.

Tabela 13 - Emissões de CO<sub>2</sub> e carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) fugitivas geradas pelos extintores de incêndio de CO<sub>2</sub> para ambos os cenários.

Fonte de emissão	%	CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> )	Total de emissões (tCO <sub>2</sub> e)
Vazamento	15	0,016	0,028
Uso em serviço	11	0,012	

Fonte: Autora, 2021.

Nota-se que apenas considerando o percentual de fuga do extintor de 11%, já geraria 11,52 kg CO<sub>2</sub>e anualmente, sendo esse um dado não controlado e não estimado pela empresa no seu cotidiano, pois a perda desse gás é invisível quando se foca no macroprocesso de fundição. Já o percentual de uso de 11%, estabelecido pelo IPCC (2006b), pode não ser tão realista para o ambiente de fundição, que é um ambiente quente, com baixa circulação de ar e diversos equipamentos, ou seja, o potencial de incêndio é grande. Vale ressaltar que nesta categoria foram apenas enquadrados os extintores de CO<sub>2</sub>, mas existem também os extintores de pó químico (ex.: fosfato monoatômico e bicarbonato de sódio) que não são considerados pela metodologia do *GHG Protocol*.

### 5.1.3 Emissões de processos industriais

Lembrando que o método adota como critério a contabilização das emissões apenas nos processos primários de transformação, não considerando os processos

secundários, como a fundição. Assim, seguindo a metodologia, considera-se que essa categoria tem emissão nula de GEE.

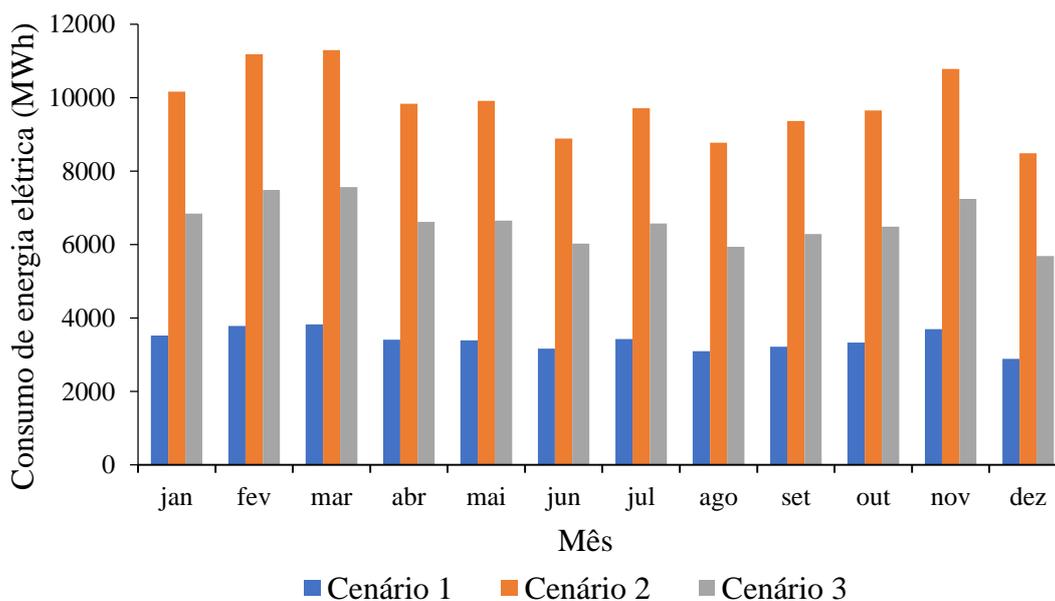
## 5.2 EMISSÕES DE GEE GERADAS NO ESCOPO 2

### 5.2.1 Avaliação do consumo de energia do processo de fundição

O montante de energia elétrica consumido mensalmente foi obtido através das faturas mensais de consumo de energia elétrica da empresa. Esse montante é aquele que representa o cenário 1 (100% de uso de sucata metálica). Usando os dados do consumo mensal de matéria-prima expostos na Figura 20, em conjunto com a Equação 8, foi possível obter o consumo mensal de energia para o cenário 2 (100% ferro fundido virgem). O cenário 3 (50% de sucata metálica e 50% de ferro fundido virgem) é uma estimativa ponderada entre ambos os outros cenários, os resultados de todos os cenários são apresentados na Figura 23.

É importante relembrar que, conforme exposto na seção 4.1.2, os dados de consumo de energia elétrica do cenário 1 abrangem também a iluminação e maquinário do setor. Esses gastos são aqui considerados irrelevantes perto do consumo dos fornos de indução que fazem a fusão dos metais.

Figura 23 - Consumo de energia elétrica para os cenários 1, 2 e 3.



Fonte: Autora, 2021.

Nota-se na Figura 23 que o consumo de energia apresentado pelo cenário 2 é razoavelmente maior do que os outros dois cenários. Isso ocorre porque durante o cálculo de consumo de energia do cenário 2 (matéria-prima totalmente virgem) são utilizados fatores teóricos que, por sua vez, conduzem os resultados para valores relativamente maiores. No geral, comparando os cenários, é notável que o cenário 2 não é desejável aqui, dada a estimativa alta de consumo de energia elétrica.

O material metálico virgem comprado já é encontrado na sua forma secundária como ferro fundido, que tem uma temperatura de fusão de aproximadamente 1200°C, segundo dados técnicos da empresa. A sucata usada no processo de fundição de carcaça possui uma composição variada devido à disponibilidade de material interno e externo. Parte da composição da sucata é proveniente dos processos internos de usinagem e estamparia, onde são usados aços de baixo carbono que possuem um ponto de fusão superior ao do ferro fundido. Outra parte da composição da sucata usada é proveniente de fontes externas, que fornecem apenas ferro fundido provenientes de motores elétrico usados.

Dessa forma, é possível verificar um aumento da temperatura do forno para atingir a fusão de ambos os materiais. A temperatura observada é ligeiramente maior que a temperatura eutética de aproximadamente 1150°C, mas há uma redução do tempo de permanência no forno. Como a sucata está triturada (Figura 16) existe uma área de contato ou superfície exposta significativamente maior do que quando se usa material metálico virgem, permitindo que o processo de fusão ocorra mais rapidamente e, assim, reduz o tempo de permanência no forno de indução.

Essa redução de tempo é refletida no consumo de energia elétrica do forno de indução. É possível observar ver essa diferença refletida na Figura 24, uma vez que o cenário com sucata consome menos energia elétrica do que aquele que com material metálico virgem. Ao final do ano de análise (2020) o cenário 1 que faz uso de somente sucata demonstrou uma economia de 77.283,62 MWh.

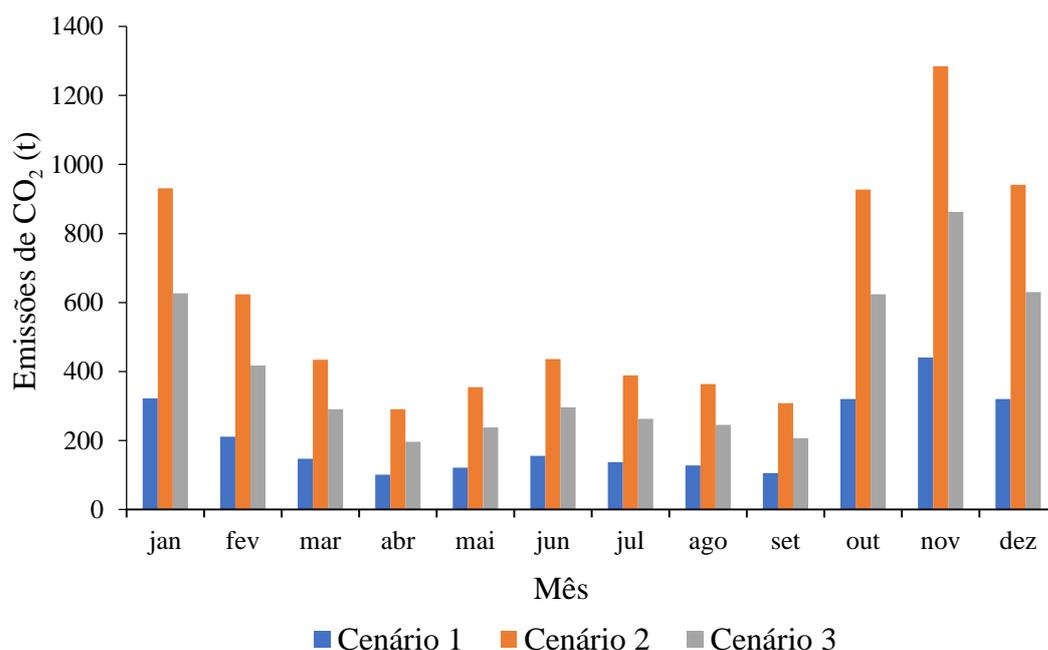
A média de consumo mensal de energia elétrica para o cenário 1 é de 3.399,09 MWh, ao passo que no cenário 2 essa média é 9.839,39 MWh. Como a produção média é de 6.693,46 t, pode-se estimar quantas toneladas são produzidas para o consumo de 1 MWh. Nesse caso, para o cenário 1 são produzidas 1,96 t/MWh e para o cenário 2 são produzidas 0,68 t/MWh. A explicação para esse fenômeno se dá pela redução de tempo necessário para fundir o metal reciclado.

### 5.2.2 Emissões geradas pelo consumo de energia no processo de fundição

Com os dados de consumo de energia e o uso da Equação 7 obtém-se os valores de emissões de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) para o consumo de energia da fabricação das carcaças de motores de todos os cenários avaliados (Figura 23). Segundo SIN (2020), é considerado apenas a emissão de CO<sub>2</sub> na produção de energia do Brasil. Os resultados das emissões de CO<sub>2</sub>e/mês de ambos os cenários são apresentados na Figura 24.

Para a estimativa do cenário 3 utilizou-se da Equação 7 e uma média ponderada do consumo total de energia e de emissões de CO<sub>2</sub>e dos cenários 1 e 2. Na Figura 25 e 26 são apresentados os consumos anuais de energia de cada cenário e a emissão de carbono equivalente anual referente a esse consumo, respectivamente.

Figura 24 - Emissões de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) mensal geradas pelo consumo de energia do cenário 1, 2 e 3.

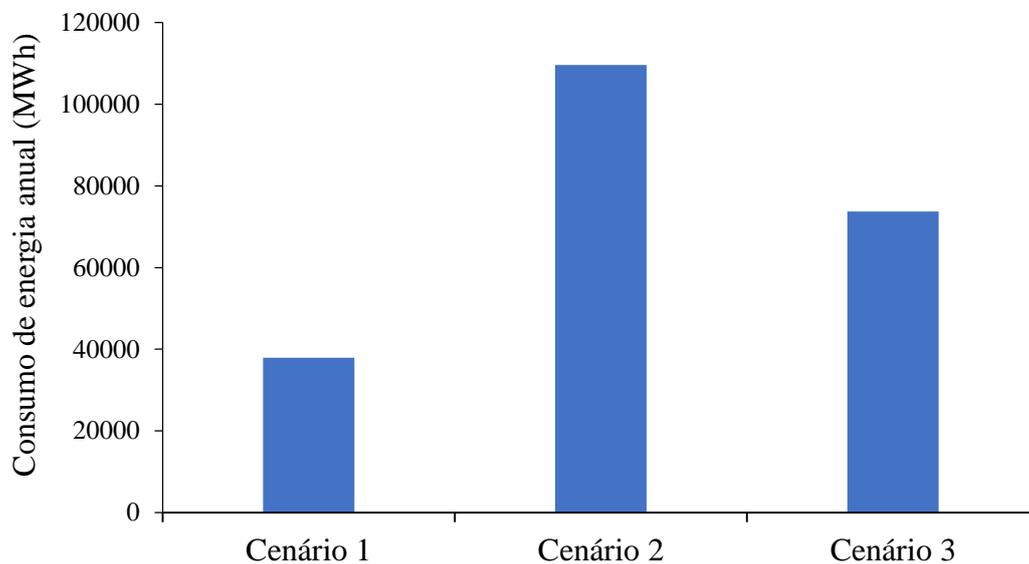


Fonte: Autora, 2021.

Avaliando os resultados apresentadas nas Figuras 25 e 26, nota-se que quanto maior o uso de sucata, menor é a geração de emissões pelo consumo de energia. Quando comparados os cenários 1 e 2 é verificado uma redução anual de 65,52% nas emissões de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e). Já quando se compara os cenários 1 e 3, mesmo que haja uma inclusão de material metálico virgem de 50% no cenário 3, projeta-se um aumento

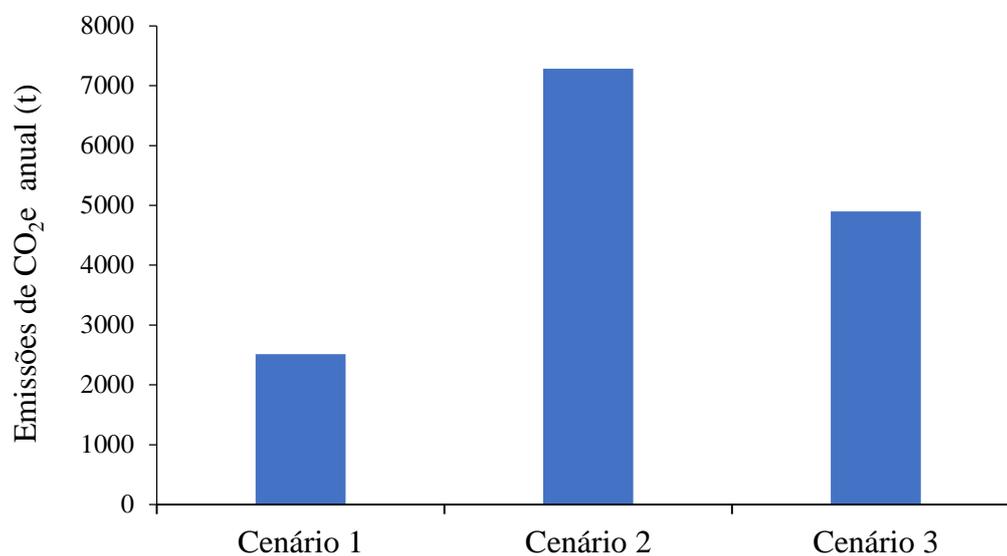
de 48,72% nas emissões de CO<sub>2</sub>e. Dessa forma, uma mudança na composição da matéria-prima pode elevar significativamente as emissões de CO<sub>2</sub>e.

Figura 25 - Consumo de energia anual de cada cenário.



Fonte: Autora, 2021.

Figura 26 - Emissões de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) anual referente ao consumo de energia de cada cenário.



Fonte: Autora, 2021.

Segundo o Idesan (2021) a compensação da energia consumida do cenário 1 poderia ser feita através do plantio de 5.767 árvores por ano. Levando em consideração

que em média um hectare comporta 1.666 árvores, seriam necessários 3,46 hectares de plantio de árvores para realizar a compensação de emissões, ou ainda, cerca de 1 campo e meio de futebol. Outro tipo de compensação que poderia ser feita é o uso de energia renovável, tanto como a compra de energia renovável certificada ou pela instalação de painéis solares, cujo fator de emissão é 0.

Ressalta-se que no Brasil apenas o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é contabilizado no cálculo do carbono equivalente (emissões GEE), uma estimativa muito irrealista, quando comparada a outros países da Europa e Estados Unidos, cujo fatores no mínimo consideram os três gases principais de reporte de emissões: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>.

Por outro lado, o fator de emissão médio do Brasil é substancialmente menor do que o fator dos outros continentes citados. Para título de comparação, podemos expor o fator do estado Michigan localizada nos Estados Unidos, que é de 0,599 tCO<sub>2</sub>e/MWh, isto é, quase 10 vezes do fator brasileiro de 0,0617 tCO<sub>2</sub>e/MWh. Essa diferença se dá devido à origem da matriz energética não renovável daquele Estado que é principalmente gerada por: gás natural, carvão e energia nuclear. O Brasil, por outro lado é um grande produtor de energia renovável através das usinas hidroelétricas e eólicas, que possuem um baixo fator de emissão de GEE associado à sua produção.

### 5.3 EMISSÕES DE GEE GERADAS NO ESCOPO 3

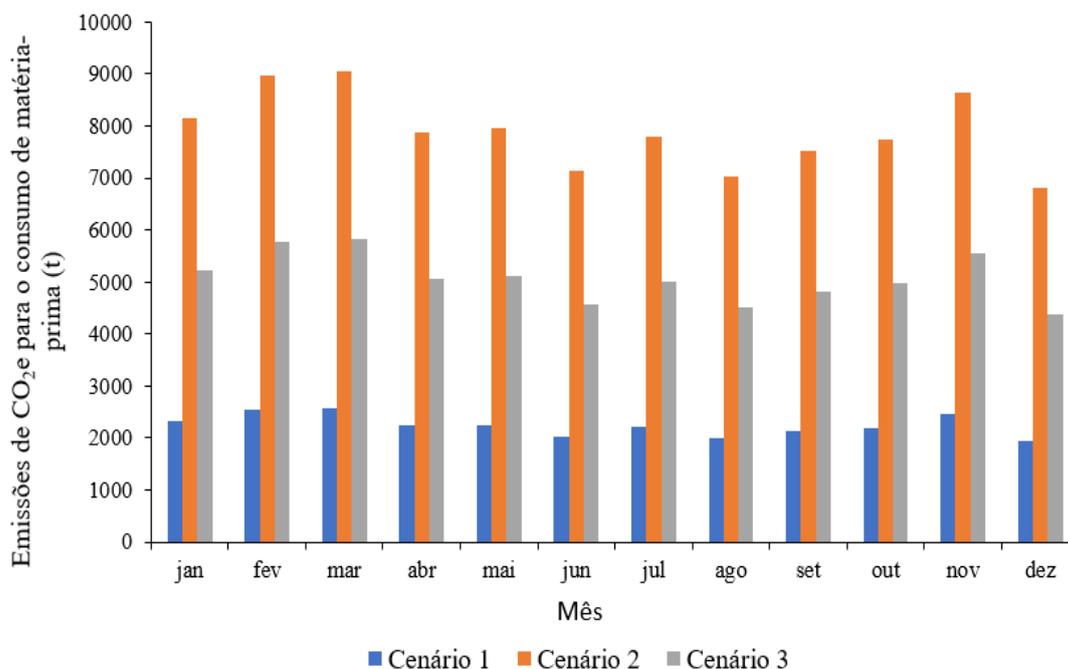
#### 5.3.1 Emissões geradas pelos bens e serviços adquiridos

As emissões geradas na compra de matéria-prima são aquelas que incluem as emissões produzidas desde a origem da matéria-prima até a produção das carcaças. Para estimar essas emissões geradas necessita-se da quantidade de matéria-prima comprada para produção das carcaças dos motores no ano de 2020, que é já foi exposta na Figura 20. Com a Equação 9 foi possível estimar as emissões geradas para esta categoria (Figura 27).

Em todos os cenários o consumo de matéria-prima (kg) é igual, conforme indicado na seção 4.1.3.1, tendo como a única diferença o tipo do material e seu fator de emissão associado. Lembrando que um cenário utiliza material metálico virgem e os outros materiais reciclados (sucata). Essa diferença de material empregado na produção das carcaças é o único fator que reflete na diferença de emissão apresentada na Figura 27.

Nota-se que os cenários que empregam material metálico virgem (cenários 2 e 3) produzem emissões de CO<sub>2</sub>e muito maiores do que aquele que emprega apenas de material reciclado (cenário 1).

Figura 27 - Emissões de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) mensal relacionadas ao consumo de matéria-prima.



Fonte: Autora, 2021.

O fator usado para o material metálico virgem, 2,357 kgCO<sub>2</sub>e/kg consultado no software considera as emissões geradas na extração do minério, transporte para indústria siderúrgica, as emissões geradas pelo processo industrial entre o coque e o ferro-gusa (explicadas na 4.1.1.2) e geradas no envio dessa matéria-prima à empresa transformadora. Já o fator referente à sucata, 0,669 kgCO<sub>2</sub>e/kg (fornecido pelo mesmo software) não inclui esses processos citados que apresentam elevada emissão de GEE, exceto o transporte da sucata até a empresa de destino.

Em seu estudo, Childress (2008) indica que o uso de sucata na indústria siderúrgica é essencial, podendo trazer economias de cerca de 74% no consumo de energia elétrica que seria destinado à extração dos minérios. Essa economia de energia reflete nos fatores, explicando primariamente a sua diferença. Nota-se que o fator de sucata representa apenas 28% do fator do material metálico virgem, isto é, há uma redução de 72%, valor muito próximo do citado por Childress (2008).

Além disso, as vantagens do uso de sucata são o seu baixo custo de aquisição, energia de processamento, redução de emissões de GEE e apoio ao mercado de reciclagem municipal. Na sequência será apresentado ainda os benefícios devido ao baixo custo e à redução de emissões relacionados com o transporte da sucata até os portões da empresa.

### **5.3.2 Emissões geradas pelo transporte e distribuição *upstream* (do berço ao portão)**

Para o produto analisado e dentro dos cenários escolhidos a categoria de transporte e distribuição tem impacto apenas no transporte do ferro fundido ou da sucata usada para fundição das carcaças. Como o objeto avaliado é um produto intermediário não se faz necessário o uso de cálculos de distribuição que consideram o tempo de armazenamento (ex.: *containers*, depósitos, etc.) do produto final até a o consumidor.

Na estimativa das emissões geradas pelo processo de transporte da matéria-prima se faz necessário obter a distância do fornecedor da matéria-prima até a empresa produtora, onde a matéria-prima será usada para produção das carcaças de motores industriais e comerciais. Como o trabalho está analisando o uso de matéria prima virgem (ferro fundido) e sucata, é preciso coletar as diferentes distâncias de transporte para cada material, conforme o apresentado abaixo:

- Ferro fundido: A distância do fornecedor de ferro fundido virgem até a empresa produtora;
- Sucata: A distância média entre os fornecedores de sucata até a empresa produtora;

Segundo a empresa, o ferro fundido virgem é fornecido por uma empresa situada na cidade de Betim, no estado de Minas Gerais. Já os fornecedores de sucata metálica são empresas de reciclagem, revendas e assistências técnicas de motores elétricos que vendem motores elétricos usados no final da sua vida útil ou sucatas de motores. Os fornecedores de sucata metálica, ao contrário dos fornecedores de ferro fundido virgem, estão localizados próximos a empresa.

Na Tabela 14 temos a distância de transporte para as duas classes de materiais usados. Para o ferro fundido virgem, como se trata de uma única empresa, utilizou-se uma

estimativa de distância entre os dois pontos considerando o trajeto rodoviário. Já para a sucata, como se tratam de diversas empresas de reciclagem locais, utilizou-se de uma média entre as empresas fornecedoras que se encontram localizadas ao redor da empresa, chegando a uma média mensal de viagens para o transporte dos materiais empregados para a realização dos cálculos.

Tabela 14 - Dados de transporte dos materiais: ferro fundido virgem e sucata.

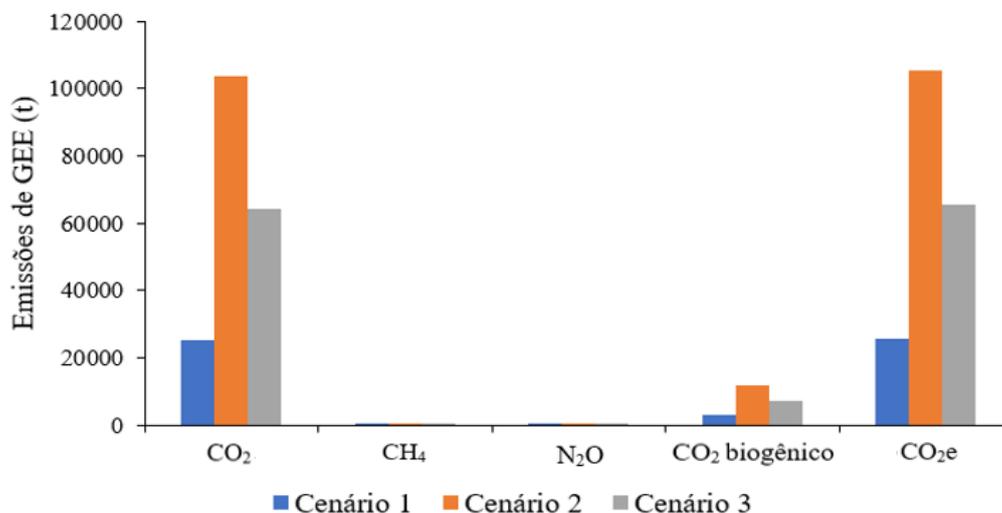
<b>Materiais Transportados</b>	<b>Quantidade total anual (t)</b>	<b>Distância média (km)</b>	<b>Média Viagens Mensais</b>	<b>Distância média anual (km)</b>
Sucata		18	30	6480
Ferro fundido virgem	40160,79	1108	2	26592

Fonte: Autora, 2021.

Usando a Tabela 14 acima e a Equação 11 e 12, obtém-se os resultados das emissões relacionadas ao transporte das matérias-primas até a empresa para cada cenário avaliado (Figura 28).

Nota-se uma grande diferença na distância entre as empresas fornecedoras de material metálico virgem e os microempresários de reciclagem de materiais metálicos que estão situados na mesma região da empresa avaliada. Essa diferença gera uma discrepância entre os cenários 1 e 2, com uma redução de anual 75,63% das emissões de CO<sub>2</sub>e para o cenário 1. Quando se comparam os cenários 1 e 3 há uma redução anual de 60,81% das emissões de GEE. Deste modo, comprova-se que uso de matéria-prima reciclada é muito importante, já que não só reduz as emissões de GEE como também pode gerar empregos na região e reduzir os impactos ambientais decorrente da extração e transformação primária de minerais. Os valores de emissão de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O são pequenos quando comparados a emissão de CO<sub>2</sub>. Para o gráfico apresentado na Figura 28, os valores de CH<sub>4</sub> para os três cenários são 1,79, 7,34 e 4,56 tCH<sub>4</sub>, respectivamente, ao passo que os valores de N<sub>2</sub>O são, respectivamente, 1,42, 5,82 e 3,62 tN<sub>2</sub>O.

Figura 28 - Emissões de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e), carbono biogênico (CO<sub>2</sub> biogênico) e gases do efeito estufa CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O geradas pelo transporte de matéria-prima.



Fonte: Autora, 2021.

Nota-se que há uma emissão de CO<sub>2</sub> biogênico proveniente da queima de biodiesel, um combustível derivado de fontes renováveis (ex.: óleos vegetais). Essa emissão de CO<sub>2</sub> biogênico não é contabilizada nas emissões totais de CO<sub>2</sub>e, pois segundo a metodologia do *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions (2013)*, a queima de combustíveis provenientes de fontes renováveis gera emissões consideradas neutras quando falamos de mudança climática. O CO<sub>2</sub> gerado com a queima de combustíveis renováveis é descendente de um ciclo biológico e não um ciclo geológico, como ocorre nos combustíveis fósseis (ex.: gasolina, diesel, petróleo, carvão e etc.).

### 5.3.3 Emissões dos resíduos gerados nas operações

Como já explicado anteriormente, o consumo de água está relacionado apenas com a necessidade fisiológica dos colaboradores da seção metalúrgica responsável pela produção das carcaças e das máquinas que utilizam água no seu funcionamento. Ao utilizar os dados de consumo de água expressos na Figura 21, a Equação 13 e a Tabela 9 que contém os fatores de emissão, obtém-se o resultado representado na Figura 29. Na Tabela 15 estão apresentados os resultados das emissões calculadas para o caso dos resíduos sólidos, utilizando as Equações 14 e 15.

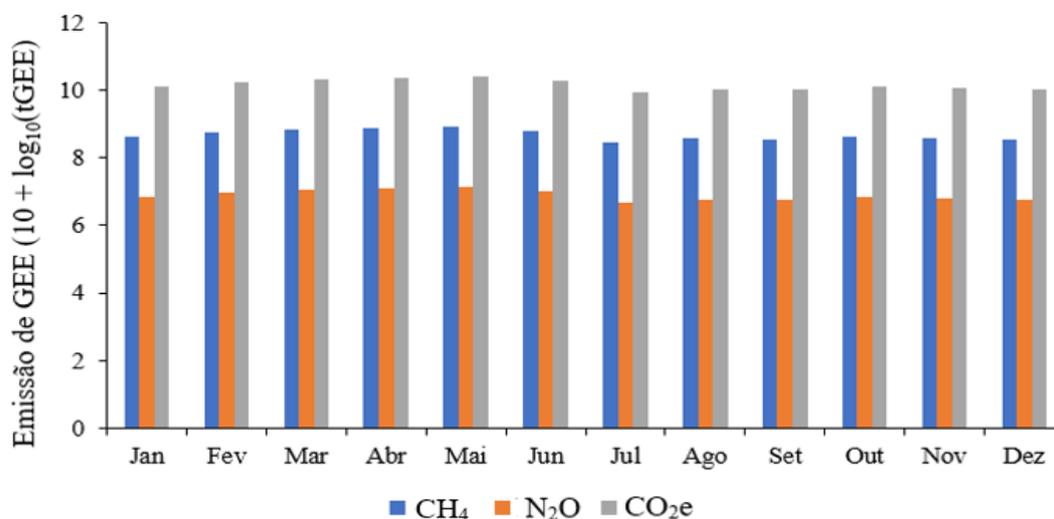
Tabela 15 - Emissões de GEE geradas pelo tratamento de resíduos sólidos para o cenário 1, 2 e 3.

Fonte de emissão	Quantidade de resíduos (t)	CO <sub>2</sub> e (tCO <sub>2</sub> e)	CH <sub>4</sub> (tCH <sub>4</sub> )
Tratamento de resíduos sólidos	130,42	161,39	6,45

Fonte: Autora, 2021.

É perceptível que para o tratamento de resíduos sólidos escolhido, há apenas a emissão de metano (CH<sub>4</sub>), gerado devido ao processo de decomposição da matéria orgânica e do papel, criando uma emissão de 6,45 tCH<sub>4</sub> ao ano, que ao ser multiplicado pelo seu GWP nos dá um total de 161,39 tCO<sub>2</sub>e ao ano.

Figura 29 - Emissões de GEE oriundas no tratamento dos efluentes do gerados nos cenários 1, 2 e 3.

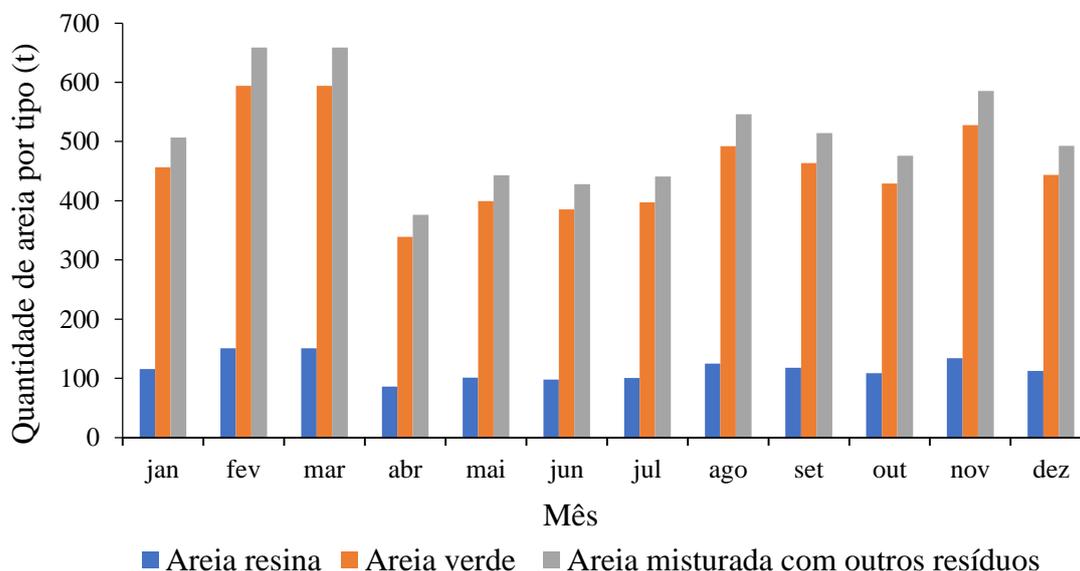


Fonte: Autora, 2021.

Dentro do ambiente de fundição de carcaças há um grande volume de resíduos provenientes dos moldes de areia usados para dar forma às peças (Figura 30). Depois de utilizada em moldes, a areia fica contaminada por metais pesados, dependendo do material de fundição, e por resinas poliméricas empregadas na compactação do molde. A areia de fundição é classificada segundo a ABNT NBR 10.004 como um resíduo perigoso (Classe I) ou como não inerte (Classe II), dependendo do processo de moldagem/macharia (SCHEUNEMANN, 2005). A metodologia do *GHG Protocol* Brasil somente incorpora resíduos como: papel, resíduos têxteis, resíduos alimentares, madeira, podas, borracha, couro, lodo de esgoto e alguns outros materiais inertes.

Na empresa avaliada, após a utilização do molde no processo de fundição, este é destruído para a retirada da peça e a areia se torna um resíduo sem reuso, que é destinado ao aterro sanitário como um resíduo Classe II (não inerte). Segundo a metodologia proposta do *GHG Protocol*, esse resíduo se encaixaria como resíduos inertes que, em condições anaeróbicas, não geram metano ( $\text{CH}_4$ ) como produto de sua decomposição, isto é, não geram emissões de GEE. É importante ressaltar que essa conclusão é retirada da metodologia do *GHG Protocol*. Sabe-se que a gestão de grandes quantidades de areia de fundição requer o adequado armazenamento, transporte e deposição final, gerando além de impactos ambientais, custos envolvidos para a adequada disposição.

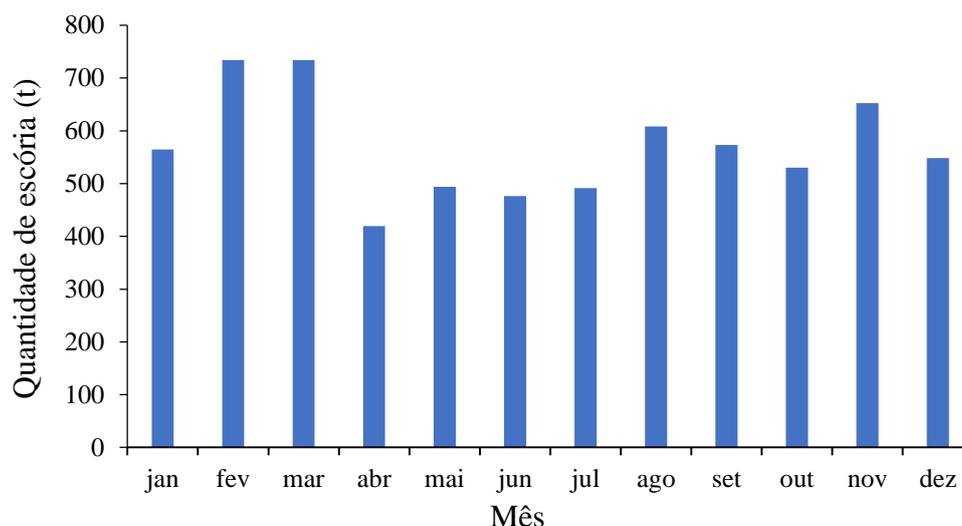
Figura 30 - Quantidade mensal dos diversos tipos de resíduos de areia de fundição que são destinados para aterro sanitário industrial.



Fonte: Autora, 2021.

De forma similar ao resíduo de areia gerada na fundição, existe a escória que é um resíduo gerado no processo de fusão de sucatas de ferro fundido. A escória assim como a areia é classificada segundo a NBR 2004 como um resíduo Classe II (não inerte), não sendo contabilizada pela metodologia do *GHG Protocol* Brasil, pois não emite GEE na sua decomposição. A Figura 31 mostra a quantidade de escória produzida mensalmente no processo de fundição da empresa avaliada. A gestão de grandes quantidades de escória de fundição requer o adequado armazenamento, transporte e deposição final, gerando além de impactos ambientais, custos envolvidos para a adequada disposição.

Figura 31 - Quantidade mensal de escória gerada no processo de fundição destinada para o aterro sanitário industrial.



Fonte: Autora, 2021.

### 5.3.4 Emissões geradas pelo deslocamento dos funcionários

Consultando a seção de recursos humanos foi possível levantar a quantidade de colaboradores na seção de fundição do ano de 2020, apresentados na Tabela 16. Na Tabela 16 é relatado a quantidade de colaboradores que atuam de forma direta, que são aqueles que participam diretamente da produção das carcaças de motores, e há também a classificação indireta que são os colaboradores que atuam como mão-de-obra adicional requerida pelo setor quando existe um aumento da produção.

Tabela 16 - Número de colaboradores da seção de fundição de carcaças.

Nº de colaboradores	Mês											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Direto	369	373	383	380	377	377	371	372	366	362	363	361
Indireto	78	78	75	75	75	75	75	72	71	70	70	69
<b>Total</b>	<b>447</b>	<b>451</b>	<b>458</b>	<b>455</b>	<b>452</b>	<b>452</b>	<b>446</b>	<b>444</b>	<b>437</b>	<b>432</b>	<b>433</b>	<b>430</b>

**Média: 445**

Fonte: Autora, 2021.

Para estimar um percentual da quantidade de funcionários que se deslocam por cada tipo de modal, utilizou-se a quantidade de vagas de estacionamento (carro e motos) e de vales-transportes oferecidos pela empresa. O Parque Fabril tem um total de 12.000

funcionários, atendendo todos os setores da empresa, e com base nisso foi levantado um percentual relativo ao modal de transporte utilizado pelos colaboradores da empresa, apresentados na Tabela 17.

Esse requisito será igual para todos os cenários pois não há variação na quantidade de colaboradores devido a variação da composição da matéria-prima para produção de carcaças de motores industriais e comerciais, sendo assim, considerou-se para ambos o cenário os mesmos valores de emissões de GEE.

**Tabela 17 - Distribuição por tipo de transporte do Parque Fabril.**

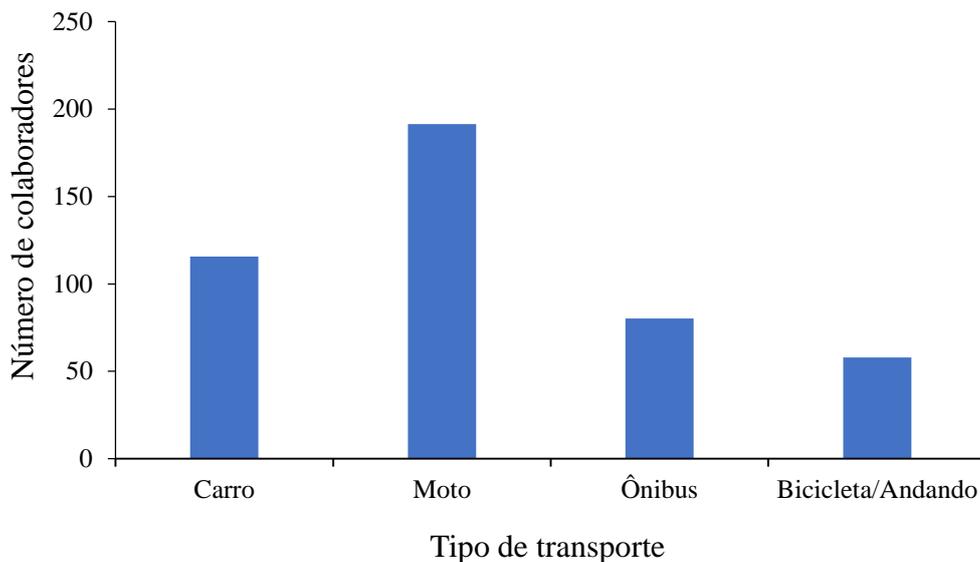
<b>Tipo de transporte</b>	<b>Nº de usuários</b>	<b>Percentual (%)</b>
Carro	3100	25,83
Motos	5130	42,75
Ônibus	2201	18,34
Bicicleta/Andando	1569	13,07

Fonte: Autora, 2021.

Estima-se que a quantidade de colaboradores que usam bicicletas ou fazem o percurso casa-trabalho caminhando são o excedente da somatória dos colaboradores que usam carro, moto e ônibus quando comparado com o número total de colaboradores. A classificação entre aqueles que fazem o percurso de bicicleta ou andando não é muito relevante pois ambos não emitem GEE, nem são consideradas nos cálculos de emissões desta categoria. Multiplicando o percentual encontrado na Tabela 17 pela média anual de colaboradores da sessão de fundição das carcaças apresentado na Tabela 16, pode-se obter o seguinte resultado apresentado na Figura 32, referente ao deslocamento casa-trabalho da seção de fundição.

Levando em consideração que a média percorrida dos colaboradores informada pela empresa avaliada é de 5,54 km/dia para ida, e que o ano de 2020 possui 251 dias úteis, ao aplicar esses valores na Equação 16 e 17 pode-se calcular as emissões de GEE oriundas do deslocamento dos colaboradores de ônibus até o seu local de trabalho, a fundição. Para carro e moto as emissões podem ser calculadas através da Equação 18 e 19. Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 33.

Figura 32 - Estimativa do número de colaboradores por tipo de locomoção na seção de fundição.

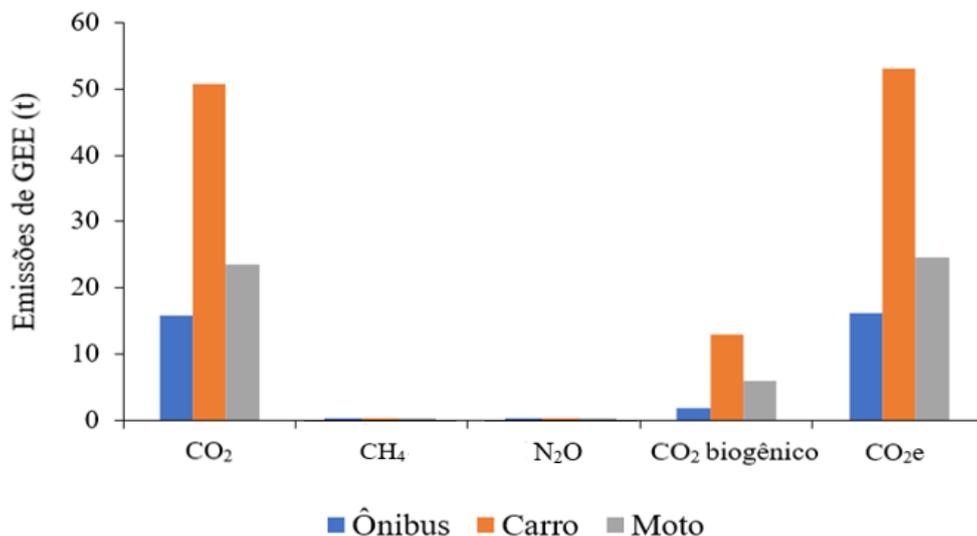


Fonte: Autora, 2021.

Na Figura 32 fica claro que o percentual de colaboradores que utilizam motocicletas é maior que o percentual que usa carros, contudo, quando avaliamos o nível de emissão de GEE na Figura 33, as emissões geradas pelos carros são superiores, mesmo usando o mesmo tipo de combustível, a gasolina. Este aumento se dá pela baixa autonomia dos carros quando comparados com as motocicletas. As emissões de CO<sub>2</sub>e do carro são 53,52% maiores que as emissões de CO<sub>2</sub>e geradas pelos colaboradores que usam motocicletas. Quando olhamos do ponto de vista do transporte individual e coletivo, como moto e ônibus, o percentual de redução se torna um pouco menor que 12,46%, demonstrando a efetividade do transporte coletivo.

Os valores de emissão de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O são pequenos quando comparados a emissão de CO<sub>2</sub>. Para o gráfico apresentado na Figura 33, os valores de CH<sub>4</sub> para os três veículos (ônibus, carro e moto) são  $8,5 \cdot 10^{-4}$ ,  $2,0 \cdot 10^{-2}$  e  $9,3 \cdot 10^{-3}$  tCH<sub>4</sub>, respectivamente, ao passo que os valores de N<sub>2</sub>O são, respectivamente,  $8,5 \cdot 10^{-4}$ ,  $6,0 \cdot 10^{-3}$  e  $2,8 \cdot 10^{-3}$  tN<sub>2</sub>O.

Figura 33 - Emissões de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e), CO<sub>2</sub> biogênico e dos gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O geradas pelo deslocamento casa-trabalho dos funcionários da seção de fundição



Fonte: Autora, 2021.

#### 5.4 EMISSÕES DE TOTAIS GEE

As emissões de GEE no contexto do *GHG Protocol* estão ligadas a categorias, possibilitando avaliar com essa metodologia as emissões de forma individual e os seus potenciais de redução. De uma maneira trivial ele serve para fazer o gerenciamento das emissões pela sua origem. Nas Tabelas 18, 19 e 20 são apresentados respectivamente os resultados obtidos em cada cenário por tipo de gás de efeito estufa. Apesar do CO<sub>2</sub> biogênico estar presente na tabela, ele não é considerado um gás de efeito estufa, mas é considerado pela metodologia como uma emissão neutra.

Na Tabela 18 estão apresentados os resultados obtidos no cenário 1, que considera 100% de matéria-prima reciclada. Entre as maiores fontes de emissão de CO<sub>2</sub>e encontradas, destacam-se os bens e serviços adquiridos e o transporte *upstream* (transporte da matéria-prima do berço até a empresa). Percebe-se que algumas das categorias de emissões se tornam invariáveis dentro do processo devido aos cenários escolhidos, como: combustão móvel, processos industriais, emissões fugitivas, resíduos e efluentes e deslocamento de funcionários. As emissões são provenientes das operações da instalação. Já a Tabela 19 apresenta os resultados do cenário 2 (hipotético), que utiliza 100% de material metálico virgem (ferro fundido).

Tabela 18 - Emissões totais de GEE por categoria do cenário 1.

Escopo	Categorias	Emissão (tGEE)				
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> b	CO <sub>2</sub> e
1	Combustão móvel	79,48	0,08	0,00027	-	81,56
	Processos industriais	0	-	-	-	0
	Fugitivas	0,03	-	-	-	0,03
2	Consumo de energia elétrica	2.511,77	-	-	-	2.511,77
3	Bens e serviços adquiridos	26.867,57	-	-	-	26.867,57
	Transporte <i>Upstream</i>	25.246,07	1,79	1,41	2.919,91	25.711,00
	Resíduos e efluentes	-	7,07	0,01	-	179,73
	Deslocamento dos funcionários	102,01	0,03	0,007	22,15	104,84
<b>Total:</b>		<b>54.806,93</b>	<b>8,97</b>	<b>1,42</b>	<b>2.942,06</b>	<b>55.456,50</b>

Fonte: Autora, 2021.

Tabela 19 - Emissões totais de GEE por categoria do cenário 2.

Escopo	Categorias	Emissão (tGEE)				
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> b	CO <sub>2</sub> e
1	Combustão móvel	79,48	0,08	0,00027	-	81,56
	Processos industriais	0	-	-	-	0
	Fugitivas	0,03	-	-	-	0,03
2	Consumo de energia elétrica	7.285,15	-	-	-	7.285,15
3	Bens e serviços adquiridos	94.658,99	-	-	-	94.658,99
	Transporte <i>Upstream</i>	103.602,4	7,34	5,82	11.982,46	105.520,26
	Resíduos e efluentes	-	7,07	0,01	-	179,71
	Deslocamento dos funcionários	102,01	0,03	0,007	22,15	104,84
<b>Total:</b>		<b>205.728,06</b>	<b>14,52</b>	<b>5,83</b>	<b>12.004,61</b>	<b>207.830,54</b>

Fonte: Autora, 2022.

No cenário 2 é possível notar que há uma intensificação na geração de GEE nas categorias de energia elétrica, bens e serviços adquiridos e transporte *upstream*. O aumento das emissões na categoria energia elétrica é significativo para esse cenário

(65%). Embora o cálculo tenha sido obtido usando um fator fornecido pela consulta ao software de Seleção de Materiais (pois não há disponível material de consulta que indique esse fator nos órgãos reguladores), o valor obtido pode estar próximo da realidade desse cenário. Como já mencionado anteriormente, o fator de sucata fornecido pelo software representa apenas 28% do fator do ferro fundido, levando a uma redução de 72% do consumo de energia, valor muito similar ao obtido por Childress (2008). É importante ressaltar que os valores fornecidos pelo software de Seleção de Materiais podem estar atrelados a um banco de dados referentes à outra região do planeta, que pode estar considerando outra matriz energética e outras peculiaridades do processo, explicando a pequena diferença (~7%). Mas como já mencionado, a fusão do ferro fundido requer maior tempo de permanência no forno de fusão, levando a um aumento significativo do consumo de energia elétrica e por consequência aumento das emissões de CO<sub>2</sub>e para essa categoria.

Já para a categoria de bens e serviços o aumento é devido ao fator escolhido, ele contém toda a emissão gerada no processo de mineração e do processamento primário de transformação do material que, conseqüentemente, gera um aumento nas emissões de GEE, quando comparado com o uso de material reciclado. Ainda, no caso do transporte *upstream* (do berço ao portão), percebe-se um grande aumento nas emissões, que se deve pela maior distância que a matéria-prima deve percorrer para chegar até a fundição. Mesmo com um grande volume de entregas para o cenário 1 (diário), ainda existe uma discrepância expressiva de quilômetros percorridos entre ambos os cenários. Por fim, na Tabela 20, estão apresentados os resultados do cenário 3 que, na verdade, é uma combinação dos dois cenários já discutidos

No cenário 3, a adição de 50% de material virgem ao processo produz um aumento de 40,91%, que se traduz em uma soma de 76.188,4 tCO<sub>2</sub>e nas emissões totais quando comparado com o cenário 1. Esse aumento se dá justamente porque, no geral, o material virgem possui categorias com quantidade maior de emissões, refletindo então também nesse cenário 3. As emissões totais geradas por cada um dos cenários estão apresentadas na Tabela 21.

A Tabela 21 indica que as emissões geradas através da fundição com matéria-prima reciclada (cenário 1) são as menores obtidas. Ainda, observa-se que o cenário com matéria-prima completamente virgem (cenário 2) tem os maiores índices de emissão dentre todos os cenários avaliados. Por fim, é possível verificar que o cenário 3, que

considera um cenário intermediário aos anteriores, apresenta um aumento das emissões de carbono equivalente de 42%, quando comparado ao cenário 1, devido à adição do material metálico virgem. Em suma, o cenário 1 apresenta uma redução de 73,3% nas emissões de carbono equivalente (CO<sub>2e</sub>), quando comparado com o cenário 2, ao passo que o cenário 3 apresenta uma redução de 36,6% quando comparado com o cenário 2. É possível concluir através dos dados que a adição de material virgem ao processo gera, diretamente, um aumento proporcional de emissões de GEE, isto é, conclui-se que para minimizar as emissões de GEE é preciso minimizar o uso de material virgem.

Tabela 20 - Emissões totais de GEE por categoria do cenário 3.

Escopo	Categorias	Emissão (tGEE)				
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> b	CO <sub>2</sub> e
1	Combustão móvel	79,48	0,08	0,00027	-	81,56
	Processos industriais	0	-	-	-	0
	Fugitivas	0,03	-	-	-	0,03
2	Consumo de energia elétrica	4.898,47	-	-	-	4.898,47
3	Bens e serviços adquiridos	60.763,28	-	-	-	60.763,28
	Transporte Upstream	64.424,23	4,56	3,61	7.451,18	65.617,01
	Resíduos e efluentes	-	7,07	0,01	-	179,71
	Deslocamento dos funcionários	102,01	0,03	0,007	22,15	104,84
<b>Total:</b>		<b>130.267,50</b>	<b>11,74</b>	<b>3,62</b>	<b>7.473,33</b>	<b>131.644,90</b>

Fonte: Autora, 2022.

Observa-se que ainda na Tabela 21 que ao comparar o uso de sucata com a material metálico virgem, o gás N<sub>2</sub>O sofre redução significativa de emissão que é devida a categoria de transporte *upstream*, pois as distâncias das recicladoras até a empresa de transformação são menores. Essa foi a maior redução percentual observada, com cerca de 75,6%, é importante notar que esse gás, dentre todos avaliados, é aquele que possui o maior GWP, ou seja, o maior potencial de aquecimento global. O gás CO<sub>2</sub> também apresenta expressiva redução nas suas emissões, cerca de 73,3%. As diferenças da emissão de CO<sub>2</sub> entre os cenários se deve a alteração da fonte de matéria prima e consequentemente pela redução do consumo energia elétrica em geral. Apesar do CO<sub>2</sub> ter

o menor GWP entre os gases avaliados, ele é encontrado em maior abundância, sendo o este o principal constituinte do CO<sub>2</sub>e.

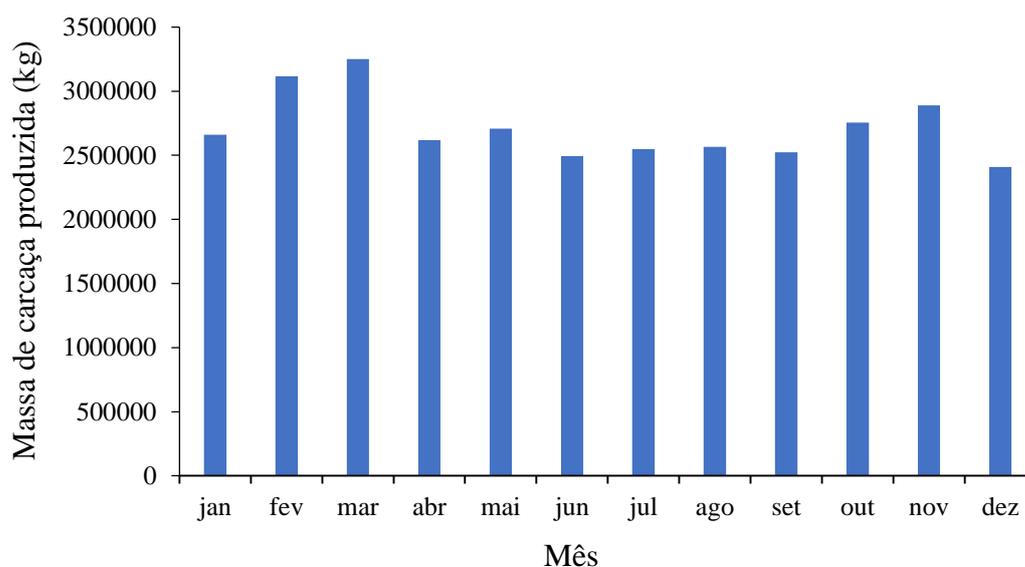
Tabela 21 - Emissões totais de GEE dos cenários 1, 2 e 3.

Cenário	Emissão (tGEE)				
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> b	CO <sub>2</sub> e
1	54.806,93	8,97	1,42	2.942,06	55.456,50
2	205.728,10	14,52	5,83	12.004,61	207.830,54
3	130.267,50	11,74	3,62	7.473,33	131.644,90

Fonte: Autora, 2022.

Através de dados internos da empresa avaliada foi possível obter a quantidade em quilos de peças finais produzidas mensalmente no departamento em que ocorre a fundição de carcaças (Figura 34). Não foi possível obter dados referentes à quantidade de carcaças fundidas em um mês, visto que existe grande variação no peso entre os diversos modelos, onde a massa dos produtos pode variar de 1kg até 3000kg. Nesse sentido, optou-se por calcular quantas toneladas de CO<sub>2</sub>e são emitidas para cada quilograma de carcaça de motor produzido.

Figura 34 - Total de peças produzidas em quilograma (kg) por mês.



Fonte: Autora, 2022.

Com base na figura acima e nos dados já apresentados na Tabela 21, foi possível levantar a quantidade de emissões de carbono equivalente (CO<sub>2e</sub>) geradas por tonelada de carcaça produzida para cada cenário analisado.

Portanto, para cada cenário foi possível obter um fator de emissão de CO<sub>2e</sub> anual apresentado na sequência:

- Cenário 1: 1,70 tCO<sub>2e</sub>/tcarcaça;
- Cenário 2: 6,38 tCO<sub>2e</sub>/tcarcaça;
- Cenário 3: 4,04 tCO<sub>2e</sub>/tcarcaça;

Na empresa a média de peso das carcaças produzidas da linha comercial mais vendida é de aproximadamente 24,73 kg por peça, que ao aplicar um o fator de emissão encontrado acima de tonelada de emissões de CO<sub>2e</sub> geradas por tonelada de carcaça. Obtém-se o seguinte resultado para a emissão média de CO<sub>2e</sub> por carcaça produzida:

- Cenário 1: 0,042 tCO<sub>2e</sub>/carcaça produzida;
- Cenário 2: 0,157 tCO<sub>2e</sub>/carcaça produzida;
- Cenário 3: 0,099 tCO<sub>2e</sub>/carcaça produzida;

Nota-se, com base nos dados apresentados, que o cenário que se utiliza somente sucata apresenta a menor emissão GEE por peça. Essa redução se dá por três principais motivos: o transporte do material até a empresa, origem do ferro fundido e a energia usada no processo de fundição, que colaboram para uma redução de 73% de emissões no processo de fundição de carcaças. Esse resultado mostra que além das vantagens de redução de emissão de GEE, surgem vantagens sociais e econômicas. A vantagem social advém da colaboração com as micro empresas recicladoras e vendas locais, próximas de onde a empresa está inserida. Já a vantagem econômica se dá pela economia na compra da sucata, que é muito mais barata que o material virgem, e também pela redução de emissões de GEE em si. Assim quando a empresa criar metas de redução de GEE, haverá menos emissões a serem supridas com a eventual compra de créditos de carbonos ou redução de emissões em outros processos da empresa para atingir essas metas e tornar o balanço de emissões nulo. A empresa já vem aplicando o cenário 1 no processo de fundição, o que demonstra que para esse processo produtivo já está em consonância com a metas de redução de emissão de GEE globais, embora alguns pontos específicos não considerados na metodologia usada podem vir a serem melhorados e contribuir para uma

maior redução, como o reaproveitamento dos resíduos gerados no processo de fundição (areia de fundição e escória).

## 5.5 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO MÉTODO

Uma das principais vantagens do uso da metodologia do *GHG Protocol* é a padronização dos cálculos e exposição de emissões em forma de categorias, que permite que ao público comum e as organizações privadas compararem e entenderem os principais impactos climáticos gerados dentro da sua cadeia de valor de forma clara e objetiva e mundialmente padronizada. É importante ressaltar que essa metodologia é adotada mundialmente quando se trata do reporte de inventários de emissões de GEE.

Uma vez que as informações estão devidamente separadas e organizadas em categorias, fica simples de informar as partes interessadas. Essa facilidade na comunicação dos dados permite que, por exemplo, se o meio social no qual a empresa está inserida vir a pressioná-la a estabelecer metas, individuais ou setoriais, e exigir o cumprimento dessas metas, ela conseguirá demonstrar com facilidade essas ações, mostrando assim que a empresa tem uma atitude de responsabilidade climática e ambiental perante a sociedade.

A divisão em escopos e em categorias facilita as organizações a mapearem todas as emissões geradas nos seus processos, mas para realizar uma análise rápida das emissões esse processo se torna complexo, dada a quantidade de métodos de cálculo por categorias (de 3 à 4). Mas cabe à organização decidir, dependendo do grau de informações que ela possui. Após a decisão do método verifica-se uma dificuldade em encontrar os fatores para o cálculo de emissões, uma vez que as organizações regulamentadoras não são transparentes e não atualizam os fatores anualmente. Estes fatores de emissão são importantes para deixar o relatório de emissões concordante com o ano avaliado, garantindo maior fidelidade nos resultados.

Ainda, por mais que a metodologia englobe os gases do efeito estufa estabelecidos pelo Protocolo de Quioto (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SF<sub>6</sub>, PFCs e HFCs), os fatores que são encontrados, em geral, reportam apenas quatro desses gases, sendo eles: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e a combinação entre eles, o carbono equivalente, CO<sub>2</sub>e. Com isso, vemos uma baixa representatividade dos demais gases que contribuem para o efeito estufa, fato esse que deve ser melhorado na metodologia, visto que existe tecnologia para tal.

Como visto anteriormente, a metodologia tem um ponto que pode ser melhorado, que é o esclarecimento da categoria de emissões de processos industriais, que não engloba processos de transformação secundário de materiais. No geral essa contagem de emissões é de difícil realização, podendo inclusive omitir possíveis emissões expressivas. A indústria de fundição é um tipo de indústria que acaba realizando processos de transformação secundários e, nesse sentido, essa melhoria na metodologia seria de grande acréscimo ao estudo como um todo.

A metodologia do *GHG Protocol* tem algumas limitações quando comparada com a ACV, no âmbito dos resíduos gerados no processo. O estudo realizado aponta que a areia de fundição e a escória não emitem GEE naturalmente e, ainda, são considerados não inertes (Classe IIA). Embora sejam da Classe IIA e não gerem emissões diretas de gases, eles podem contaminar o ambiente e devem ter a gestão adequada visando à redução do impacto ambiental. O manuseio, armazenamento e o transporte dos resíduos pode ser uma fonte de emissão de GEE, porém, essa categoria de impacto não é considerada na metodologia.

## 6. CONCLUSÕES

No geral, as metodologias existentes para cálculo de emissões de GEE, como o *GHG Protocol*, se mostram abrangentes para os cenários avaliados. Como visto, em casos específicos como o da areia de fundição e a escória, não existe uma cobertura por parte da metodologia *GHG Protocol* empregada, porém, ainda assim é possível realizar boas estimativas quanto às emissões de uma entidade qualquer.

Após realizar a análise das emissões de GEE da empresa para os três cenários distintos, fica claro que o uso de material virgem implica em emissões significativamente maiores quando comparado com o uso de sucata. Essa diferença se dá principalmente pelo fato de que a sucata não tem atrelada a si as emissões provenientes da extração e preparação do material, presentes para o material virgem. A diferença das emissões se mostrou expressiva, de forma que mesmo quando se utiliza 50% de material virgem e 50% de sucata na composição, grandes teores de emissões GEE são percebidos. A conclusão que se chega ao avaliar esses dados é a de que economias do tipo “*cradle to cradle*”, que são circulares, tornam-se muito mais amigáveis com o meio ambiente quando comparadas àquelas do tipo “*cradle to gate*” ou “*cradle to grave*”, que são lineares.

Nesse sentido, uma das formas de atingir um modelo econômico “*cradle to cradle*”, nesse setor, é através do emprego de matéria-prima reciclada (sucata metálica) nos processos. O uso desse tipo de material permite que a empresa ou setor, além de reduzir suas emissões, possa movimentar a economia local através da compra de sucata, melhorando o cenário no qual a empresa está inserida. É importante ressaltar que esse impacto causado na economia local é devido apenas ao desejo da empresa de reduzir suas emissões, o que demonstra novamente a importância das organizações se mobilizarem pelas políticas de redução de emissões. Finalmente, no caso estudado, vemos que ao comparar o cenário da matéria-prima completamente virgem com o cenário da matéria-prima completamente reciclada, constatou-se uma redução de aproximadamente 73% das emissões de GEE.

Em específico, as emissões de dois gases GEE foram as que apresentaram maiores reduções, quando do uso de 100% de sucata no processo de fundição: redução de, 75,6% para o N<sub>2</sub>O e de 73,3% CO<sub>2</sub>. No caso do N<sub>2</sub>O, essa grande redução se deu justamente pelo

transporte *upstream*, visto que a distância entre a recicladora e a empresa compradora é muito menor, reduzindo o uso de combustível. Já para o caso do CO<sub>2</sub>, a redução da emissão se dá pela origem da matéria prima reciclada, que por necessitar de menos energia em sua coleta, entrega menores fatores de emissão, e também existe a influência do próprio processo de fundição que, como visto, apresenta uma significativa redução no consumo de energia elétrica.

Por fim, a busca por processos industriais mais limpos também para o processo de fundição é uma tarefa essencial, afinal, o desenvolvimento desse setor reflete diretamente o desenvolvimento da indústria do país no qual ele está inserido. Esses caminhos podem e devem estar intimamente ligados aos princípios de sustentabilidade, já bem conhecidos, afinal, uma indústria preocupada com o meio ambiente é reflexo de um país preocupado com o meio ambiente. Em síntese, conclui-se que a economia de modelo “*cradle-to-cradle*” contribui para uma redução significativa nas emissões de GEE, assim como os processos de logística reversa.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir estão listadas algumas sugestões que podem complementar o estudo, em trabalhos relacionados a essa temática abordada:

- Coletar dados de um período maior de tempo para averiguar a assertividade dos cálculos;
- Realizar a mesma análise em outros setores da indústria fundição;
- Realizar a avaliação dos processos de fundição de carcaças com metodologia ACV (ISO 14064);
- Comparar este trabalho com a ACV para identificar limitações da metodologia do *GHG Protocol*;
- Replicar o estudo para outras empresas e verificar se o padrão de resultados se mantém entre diversas empresas do mesmo ramo;
- Estudar o impacto da logística reversa na redução de GEE's;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBIENTE BRASIL. **Efeito Estufa**. 2021. Disponível em: [https://ambientes.ambientebrasil.com.br/mudancas\\_climaticas/artigos/efeito\\_estufa.htm](https://ambientes.ambientebrasil.com.br/mudancas_climaticas/artigos/efeito_estufa.htm). Acesso em: 18 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2001.10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 14064:1: Gases de efeito estufa**: Especificação e orientação a organizações para quantificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de gases de efeito estufa. Rio de Janeiro, 2007. 20 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14064:2: Gases de efeito estufa**: Especificação e orientação a projetos para quantificação, monitoramento e elaboração de relatórios das reduções de emissões ou da melhoria das remoções de gases de efeito estufa. Rio de Janeiro, 2007. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14064:3: Gases de efeito estufa**: Especificação e orientação para a validação e verificação de declarações relativas a gases de efeito estufa. Rio de Janeiro, 2007. 37 p.

BARROW, M. et. al. **Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions**. 1. ed. Washington: World Resources Institute, 2013. 182 p.

BHATIA, Pankaj. **Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard**. United States: World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2011. 148 p.

BENTO, R.; BRUNHARO, I. **Programa Brasileiro GHG Protocol**: Guia para a elaboração de inventários corporativos de emissões de gases do efeito estufa (GEE). São Paulo: Fundação Getúlio Vargas. Centro de Estudos em Sustentabilidade da EAESP, 2009. 21 p. Realização do Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas; organização GVces, Ministério do Meio Ambiente, CEBDS, WBCSD, WRI.

BJØRN, Anders; STRANDESEN, Maria. **The Cradle to Cradle concept-is it always sustainable?**. In: The Life Cycle Management (LCM) conference: Towards Life Cycle Sustainability Management. 2011.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis. Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis. **Gasolina**. 2020. Disponível em:

<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/gasolina>. Acesso em: 23 fev. 2022.

BUENO, Y. M. L.; TONIAL, L. M. S. **Caracterização de resíduos do processo de fundição: um olhar sustentável**. *Environmental Scientiae*, v.3, n.2, p.1-12, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2674-6492.2021.002.0001>

CALLISTER, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**, LTC, 2006.

CASOTTI, B. P.; BEL FILHO, E. D.; CASTRO, P. C. de. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas**. *BNDES Setorial*, n. 33, p. 121-162, mar. 2011.

CASTRO, R.; PEREIRA, F.; FREITAS, N. Inventory of greenhouse gases for steel foundries. *Sistemas & Gestão*, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 55-67, 10 mar. 2018. Laikos Servicos Ltda. <http://dx.doi.org/10.20985/1980-5160.2018.v13n1.1180>.

CHILDRESS, Vincent W. **Scrap Metal Recycling**. *Technology and Engineering Teacher*, v. 67, n. 5, p. 13, 2008.

CLAUDINO, E. S.; TALAMINI, E. **Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio: uma revisão de literatura**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 77-85, jan. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662013000100011>.

COLTRO, L. **Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão**. Campinas: Cetea/Ital, 2007. 72 p.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1996.

CEBDS. **O que é o Acordo de Paris?** 2019. Disponível em: <https://cebds.org/o-que-e-o-acordo-de-paris/#.YX8RBp5KjIV>. Acesso em: 27 out. 2020.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE (GVCES)a. **Classificação das Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) de Escopo 1 nas Respectivas Categorias de Fontes de Emissão**. 1 ed. São Paulo: Centro de Estudos em Sustentabilidade (Gvcés), 2016. 3 p.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE (GVCES)b. **Valores de referência para o potencial de aquecimento global (GWP) dos gases de efeito estufa – versão 1.0**. 1 ed. São Paulo, 2016. 5 p.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE (GVCES)a. **Diretrizes para a contabilização de emissões de Escopo 2 em inventários organizacionais de gases de efeito estufa no âmbito do Programa Brasileiro GHG Protocol**. 4. ed. São Paulo: Centro de Estudos em Sustentabilidade (Gvcés), 2018. 24 p.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE (GVCES)b. **Definição das categorias emissões de gases de efeito estufa (GEE) de Escopo 3.** 2 ed. São Paulo: Centro de Estudos em Sustentabilidade (Gvc.es), 2018. 6 p.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE (GVCES). **Ferramenta de cálculo:** Programa Brasileiro GHG Protocol. Programa Brasileiro GHG Protocol. 2021. Disponível em: <http://ferramenta.ghgprotocolbrasil.com.br/index.php?r=site/ferramenta>. Acesso em: 31 jan. 2022.

CETESB. **Gases do Efeito Estufa e Fontes de Emissão.** 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/>. Acesso em: 12 out. 2021.  
GREENHOUSE GAS PROTOCOL. **What is GHG Protocol?.** 2021. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/about-us>. Acesso em: 12 out. 2021.

CETESBa. **COP1 – Berlim, Alemanha (Março/Abril de 1995).** 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/conferencia-das-partes-cop/cop-1-berlim-alemanha-marco-abril-de-1995/>. Acesso em: 27 nov. 2021.

CETESBb. **COP18 / MOP8 – Doha, Catar (Novembro/Dezembro 2012).** 2020. Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/conferencia-das-partes-cop/cop-18-mop-8-doha-catar-novembro-dezembro-2012/>. Acesso em: 27 nov. 2021.

CES EduPack, **Granta Design Limited**, Cambridge, UK, 2014

DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT FOOD AND RURAL AFFAIRS (DEFRA). **Greenhouse gas reporting: conversion factors 2020.** 2020. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2020>. Acesso em: 26 jan. 2022.

ELORZ, J. A. P.-S.; GONZÁLEZ, D. F.; VERDEJA, L. F. **Physical Metallurgy of Cast Irons.** Cham: Springer, 2018.

FRANCKLIN, A. R. **Um breve estudo sobre ferro fundido nodular.** 2009. 30 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Produção Siderúrgica, Centro Universitário Estadual do Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2009.

FORUM CLIMA (São Paulo). Guia metodológico para inventaria de emissões de gases de efeito estufa na engenharia e construção. São Paulo: Fórum Clima, 2013. 27 p.

GREENHOUSE GAS PROTOCOL. **About us.** 2021. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/>. Acesso em: 27 out. 2021.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos.** São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

GODOY, S. G. M.; PAMPLONA, J. O protocolo de Kyoto e os países em desenvolvimento. **Pesquisa & Debate.** São Paulo, p. 329-353. 27 ago. 2007.

HELBER, J. **A análise da pegada de carbono na indústria fundição.** São Paulo: Fundação & Serviços, v. 248, ago. 2016. Semanal. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/assets/revistas/fs/2016/agosto/index.php#page=30>. Acesso em: 01 jan. 2022.

HERTWICH, E. G.; WOOD, R. The growing importance of scope 3 greenhouse gas emissions from industry. **Environmental Research Letters**, [S.L.], v. 13, n. 10, p. 104013, 5 out. 2018. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aae19a>.

KAZA, S. *et al.* **What a waste 2.0:** A global snapshot of solid waste management to 2050. 2. ed. Washington: International Bank for Reconstruction and Development, 2018. 271 p.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos.** São Paulo: Blucher, 2013.  
IDESAM (São Paulo). **Calculadora de CO<sub>2</sub>.** 2021. Disponível em: <https://idesam.org/calculadora/>. Acesso em: 26 nov. 2022.

LI, Yi. **Pegada de carbono: O caso da cidade do Porto.** 2018. 39 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Porto, Porto, 2018.

IDESAM (São Paulo). **Calculadora de CO<sub>2</sub>.** 2021. Disponível em: <https://idesam.org/calculadora/>. Acesso em: 26 nov. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC)a. **Chapter 4: Metal Industry Emissions.** In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (ed.). **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Genebra: IPCC 2006. Cap. 4. p. 41-83.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC)b. **Emissions of Fluorinated Substitutes for Ozone Depleting Substances.** In: CHANGE, Intergovernmental Panel on Climate. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Genebra: IPCC, 2006. Cap. 7. p. 7-71.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC)c. **Wastewater Treatment and Discharge.** In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Genebra: IPCC, 2006. Cap. 6. p. 1-23.

MACHADO, R. **Comissão aprova proposta que regulamenta mercado de negociação de créditos de carbono.** Fonte: Agência Câmara de Notícias. 2021. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/775240-comissao-aprova-proposta-que-regulamenta-mercado-de-negociacao-de-creditos-de-carbono/>. Acesso em: 26 jan. 2022.

MATTOS, L. B. R. de. **A importância do setor de transportes na emissão de gases do efeito estufa**: o caso do município do rio de janeiro. 2001. 222 f. Monografia (Especialização) - Curso de Ciências em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MATTEDE, H. **Tipos de motores elétricos, quais são?** Mundo da Elétrica, 2022. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/tipos-de-motores-eletricos-quais-sao/>>. Acesso em: 04 fev. 2022.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTIC). **Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima - IPCC**. Disponível em: [https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/ciencia\\_do\\_clima/painel\\_intergovernamental\\_sobre\\_mudanca\\_do\\_clima.html](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/ciencia_do_clima/painel_intergovernamental_sobre_mudanca_do_clima.html). Acesso em: 18 fev. 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Rio de Janeiro. **Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários**. 2014. Disponível em: <https://iema-site-staging.s3.amazonaws.com/2014-05-27inventario2013.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balço Energético Nacional 2020 (ano base 2019)**. Brasil. 2020. Disponível em: Ministério de Minas e Energia. Acesso em: 26 jan. 2022.

MENEGUIN, F. B. O que é o mercado de carbono e como ele opera no Brasil. Brasil. **Economia e governo**, v. 28, 2012.

MORAES, C. A. M. *et al.* Elaboração de plano de gerenciamento de resíduos sólidos de empresas de fundição de ferro fundido de pequeno porte. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, [S.L.], v. 10, n. 4, p. 296-302, 2013. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2013.041>.

MONZONI, M. *et al.* **Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol**: contabilização, quantificação e publicação de inventários corporativos de emissões de gases de efeito estufa. 2. ed. São Paulo: World Resources Institute, 2020. 39 p.

MUNHOZ, M. G. C. **Identificação e análise de defeito de fundição em coletor de freio motor**. 2017. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná C, Londrina, 2017.

NÚCLEO DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA – (NAE). 2005, **Mudança do clima**: Volume 1, Cadernos NAE, No. 3, Brasília, DF: NAE.

OLAUSSON, H. **A tool for calculating CO<sub>2</sub> emissions in the manufacturing industry: Use of GHG Protocol**. 2020. 20 f. Curso de Environmental Science, Halmstad University, Halmstad, 2020.

OLIVEIRA, J. G. S. M. de. **Materiais usados na construção de motores elétricos**. 2009. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Católica do Rio Grande do Sul., Porto Alegre, 2009.

OLIVEIRA, P. P. A. **A pecuária em sistemas integrados e as mudanças climáticas**. A Integração da Lavoura-Pecuária-Floresta, Riberão Preto, v. 40, n. 12, p. 30-31, 2015.

OLIVEIRA, A. S. **Tratamento diferenciado dos países em desenvolvimento e mudanças climáticas: perspectivas a partir do acordo de paris**. 2017. 256 f. Tese (Doutorado) - Curso de Direito, Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Porto Alegre, 2017.

RANGANATHAN, J. *et al.* **A corporate accounting and reporting standard: revised edition**. Washington: World Resources Institute, 2000. 116 p.

RECKZIEGEL, V. N. **Caracterização para o aproveitamento do resíduo de um triturador de sucata em uma usina siderúrgica**. 2012. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RIBEIRO, M. S. **O tratamento contábil dos créditos de carbono**. 2005. 92 f. Tese (Doutorado) – Curso de Economia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ROCHA, M. T. **Aquecimento Global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT**. 2003. 214 f. Tese (Doutorado) - Curso de Economia Aplicada., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SANQUETTA, C. R. *et al.* Estimativa das emissões de gases de efeito estufa em uma obra de construção civil com a metodologia GHG Protocol. **Enciclopédia Biosfera**. Goiânia, p. 1088-1104. 17 jun. 2-13.

SANTOS, M. A. **Inventário das emissões de gases de efeito estufa derivadas de hidrelétricas**. 2000. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

SENA, F. B.; MARINS, K. R.C. **Análise Alométrica das Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Municípios Paulistas**. III Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana [Singeurb 2021], [S.L.], v. 3, n. 0, p. 180-186, 20 dez. 2021. Antac. <http://dx.doi.org/10.46421/singeurb.v3i00.908>.

SCHEUNEMANN, R. **Regeneração de areia de fundição através de Tratamento Químico via Processo Fenton**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

SCIENCE-BASED TARGETS. **What are ‘science-based targets’?** 2021. Disponível em: <https://sciencebasedtargets.org/how-it-works>. Acesso em: 31 out. 2021.

SGS (São Paulo). ISO 14064 - **Responsabilidade e verificação de gases do efeito estufa**. 2020. Disponível em: <https://www.sgs.com.br/pt->

br/sustainability/environment/carbon-services/greenhouse-gas-emissions-and-lifecycle-assessment/iso-14064-greenhouse-gas-accounting-and-verification. Acesso em: 19 nov. 2021.

SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL DO BRASIL (SIN). São Paulo. **Fator médio - Inventários corporativos**. 2020. Disponível em: [https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao\\_corporativos.html](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html). Acesso em: 23 jan. 2022.

SOARES, G. A. **Fundição: mercado, processos e metalurgia**. Rio de Janeiro: Coppe Ufrj, 2000. 123 p.

SOILCARE PROJECT. **Equivalente CO<sub>2</sub>**. 2022. Disponível em: <https://soilcare-project.eu/pt/resources/glossary/all-terms/82:co2-equivalent>. Acesso em: 31 jan. 2022.

SOTOS, M. **GHG Protocol Scope 2 Guidance: executive summary**. 3. ed. Washington: World Resources Institute, 2015. 8 p.

PRAÇA, L. G.; AZEVEDO, J. N. **Economia circular - o amanhã da sustentabilidade**. In I Congresso Internacional em Planeamento Sustentável e Ordenamento Territorial. Funchal - Ilha da Madeira (Portugal), 2018.

PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL. **O Programa Brasileiro GHG Protocol**. 2021. Disponível em: <http://ferramenta.ghgprotocolbrasil.com.br/index.php?r=site/conteudo&id=1>. Acesso em: 07 out. 2021.

TONG, W. **Mechanical Design of Electric Motors**. Virginia: Taylor & Francis Group, Llc, 2014. 737 p.

UK GOVERNMENT. **COP 26: The Negotiations Explained**. Glasgow, 2021. 18 p.

UK GOVERNMENT; UNFCCC. **What do we need to achieve at COP26**. 2021. Disponível em: UK GOVERNMENT. COP 26: The Negotiations Explained. Glasgow, 2021. 18 p. Acesso em: 19 nov. 2021.

WAYCARBON. **O que é o Programa GHG Protocol? E por que devo participar?** 2016. Disponível em: <https://blog.waycarbon.com/2016/08/o-que-e-o-programa-ghg-protocol-por-que-e-como-participar/>. Acesso em: 28 out. 2021.

WINTERGREEN, J.; DELANEY, T. ISO 14064, **International Standard for GHG Emissions Inventories and Verification**, 2007.

WRI. **Metodologia do GHG Protocol da agricultura**. São Paulo: Unicamp, 2015. 59 p. Disponível em: [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards\\_supporting/Metodologia.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards_supporting/Metodologia.pdf). Acesso em: 26 set. 2021.

WEG. **W22 Motor trifásico - Catálogo comercial.** Jaraguá do Sul: Weg, 2020. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hb7/h10/WEG-w22-motor-trifasico-50025536-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2021.