

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

JOÃO PEDRO LEAL DIAS

**SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS POR COMBUSTÍVEIS  
ALTERNATIVOS NO ESPÍRITO SANTO E SEUS IMPACTOS NA GERAÇÃO DE  
GASES DE EFEITO ESTUFA: UMA ANÁLISE DO SETOR ENERGIA E INDÚSTRIA**

VITÓRIA

2024

JOÃO PEDRO LEAL DIAS

**SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS POR COMBUSTÍVEIS  
ALTERNATIVOS NO ESPÍRITO SANTO E SEUS IMPACTOS NA GERAÇÃO DE  
GASES DE EFEITO ESTUFA: UMA ANÁLISE DO SETOR ENERGIA E INDÚSTRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental, do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Furieri

VITÓRIA

2024

JOÃO PEDRO LEAL DIAS

**SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS POR COMBUSTÍVEIS  
ALTERNATIVOS NO ESPÍRITO SANTO E SEUS IMPACTOS NA GERAÇÃO DE  
GASES DE EFEITO ESTUFA: UMA ANÁLISE DO SETOR ENERGIA E INDÚSTRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Departamento de Engenharia Ambiental, do  
Centro Tecnológico da Universidade Federal do  
Espírito Santo, como requisito para obtenção de  
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovado em 29 de julho de 2024

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Bruno Furieri  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

Prof. Dr. Ademir Abdala Prata Junior  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

Profa. Dra. Elisa Valentim Goulart  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinadora

## RESUMO

O Efeito Estufa é um fenômeno natural que possibilita que a Terra tenha uma temperatura média compatível com a vida humana, entretanto o equilíbrio entre a energia solar incidente e a energia refletida, pode ser alterado devido à diversos fatores, dentre eles, o aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, que bloqueiam a saída de uma parcela do calor que deveria ser irradiado para o espaço. O aumento da concentração desses gases ocorre, em sua maioria, devido à combustão de combustíveis fósseis, sendo os sistemas de geração de energia, ou setor energético, responsáveis por contribuir com mais de 90% das emissões de CO<sub>2</sub> e 75% do total de emissões de GEE no Brasil. Sendo assim, o estudo tem como objetivo analisar a substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos na siderurgia do estado do Espírito Santo, responsável por 14,88 MtCO<sub>2</sub>eq, cerca de 63,5% das emissões do setor no estado, e seus impactos na geração de gases de Efeito Estufa. Para estimar as emissões de GEE da siderurgia no setor Energia e Indústria, foram utilizadas as equações presentes no guia IPCC, considerando o primeiro nível de complexidade (Tier 1) e o risco de dupla contagem ao estimar as emissões das categorias produção de coque e produção de ferro e aço. Foi constatado que a siderurgia é responsável pela maior parte das emissões de GEE no Espírito Santo, especialmente devido à obtenção de ferro-gusa no alto-forno. Os principais combustíveis fósseis utilizados são o carvão metalúrgico e o coque, enquanto os combustíveis alternativos incluem o hidrogênio, o gás natural e a biomassa. O hidrogênio apresenta maior custo, mas pode reduzir as emissões em até 24%. O gás natural pode auxiliar na redução de 16% das emissões na sinterização e 24% no alto-forno. A biomassa, como o carvão vegetal, pode reduzir as emissões em diferentes etapas. No geral, a combinação dos principais combustíveis alternativos pode reduzir as emissões totais da siderurgia em até 23%. O Espírito Santo tem potencial para atender a demanda de hidrogênio e gás natural, mas será necessário aumentar a oferta de biomassa. Medidas devem ser adotadas para substituir os combustíveis fósseis por opções alternativas, com incentivos fiscais e políticos para alcançar os objetivos de mitigação dos gases de efeito estufa.

**Palavras-chave:** Combustíveis fósseis. Biocombustíveis. Gases do Efeito Estufa.

## **ABSTRACT**

The Greenhouse Effect is a natural phenomenon that allows the Earth to have an average temperature compatible with human life. However, the balance between incoming solar energy and reflected energy can be altered due to various factors, including the increase in the concentration of greenhouse gases (GHG) in the atmosphere, which trap a portion of the heat that should be radiated back into space. The increase in the concentration of these gases is mainly caused by the combustion of fossil fuels, with the energy generation systems, or the energy sector, being responsible for over 90% of CO<sub>2</sub> emissions and 75% of total GHG emissions in Brazil. Therefore, the study aims to analyze the substitution of fossil fuels with alternative fuels in the iron and steel industry in the state of Espírito Santo, which is responsible for 14.88 MtCO<sub>2</sub>eq, approximately 63.5% of the sector's emissions in the state, and its impacts on greenhouse gas emissions. To estimate the GHG emissions from the steel industry in the Energy and Industry sector, equations from the IPCC guide were used, considering the Tier 1 and the risk of double counting when estimating emissions from coke production and iron and steel production categories. It was found that the steel industry is responsible for the majority of GHG emissions in Espírito Santo, especially due to the production of pig iron in the blast furnace. The main fossil fuels used are metallurgical coal and coke, while alternative fuels include hydrogen, natural gas, and biomass. Hydrogen has a higher cost but can reduce emissions up to 24%. Natural gas can help reduce emissions by 16% in sintering and 24% in the blast furnace. Biomass, such as charcoal, can reduce emissions in different stages. Overall, the combination of the main alternative fuels can reduce total emissions from the steel industry up to 23%. Espírito Santo has the potential to meet the demand for hydrogen and natural gas, but there is a need to increase the supply of biomass. Measures must be taken to replace fossil fuels with alternative options, with fiscal and political incentives to achieve greenhouse gas mitigation goals.

**Keywords:** Fossil fuels. Biofuels. Greenhouse gases.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquematisação do efeito estufa natural .....	17
Figura 2 – Decaimento de alguns dos gases do efeito estufa presentes na atmosfera. .....	18
Figura 3 – Global Warming Potential (GWP) - valores relativos ao CO <sub>2</sub> .....	18
Figura 4 – Emissão mundial de GEE por setor, em GtCO <sub>2</sub> eq.....	20
Figura 5 – Emissão nacional de GEE por setor.....	20
Figura 6 – Distribuição das emissões no setor Energia .....	21
Figura 7 – Emissões de GEE no setor Industrial por subsetores .....	22
Figura 8 – Emissões de GEE por atividade no Brasil .....	23
Figura 9 – Emissões de CO <sub>2</sub> do subsetor Atividade de Queima de Combustíveis por categoria.....	23
Figura 10 – Emissões do setor IPPU de 1990 a 2020.....	24
Figura 11 – Emissões acumuladas nos principais subsetores gerados de GEE no ES .....	25
Figura 12 - Inventário de emissões de GEE do ES em MtCO <sub>2</sub> eq/ano e participação percentual de cada subsetor do setor Energia e Indústria, ano base 2021.....	26
Figura 13 – Desagregação das emissões na siderurgia para os setores Energia e Indústria .....	30
Figura 14 – Classificação dos principais tipos de hidrogênio em escala de cores ...	31
Figura 15 – Tarifas do gás natural canalizado da companhia de gás do Espírito Santo .....	32
Figura 16 – Etapas da produção integrada de ferro e aço .....	33
Figura 17 – Fluxograma do processo de produção de aço .....	34
Figura 18 – Fluxo de massa da coqueria .....	36
Figura 19 – Fluxo de massa da sinterização .....	37
Figura 20 – Fluxo de massa da pelletização .....	39
Figura 21 – Fluxo de massa do alto-forno .....	40
Figura 22 – Fluxo de massa da aciaria .....	41
Figura 23 – Representatividade das emissões da siderurgia .....	43
Figura 24 – Relação entre massa de hidrogênio injetada no alto-forno e a emissão de CO <sub>2</sub> .....	45
Figura 25 – Representatividade da geração de energia por fonte geradora .....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tecnologias de obtenção do hidrogênio pela eletrólise.....	32
Tabela 2 – Emissões de CO <sub>2</sub> por etapa da siderurgia.....	42
Tabela 3 – Consumo total de cada combustível, considerando mitigação em cada processo.....	46
Tabela 4 – Redução das emissões de GEE a partir da substituição das fontes.....	48
Tabela 5 – Comparação de combustível necessário e combustível disponível.....	49
Tabela 6 – Estimativa do custo total do uso dos combustíveis.....	50
Tabela 7 – Estimativa da potência instalada necessária para produção de hidrogênio de acordo com a tecnologia utilizada .....	51

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fatores de Emissão de CO <sub>2</sub> para produção de coque e produção de ferro e aço .....	29
Quadro 2 – Diretriz 1 do Plano de Descarbonização e Neutralização das Emissões de GEE.....	47
Quadro 3 – Diretriz 2 do Plano de Descarbonização e Neutralização das Emissões de GEE.....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS

AFOLU	<i>Agriculture, Forests, Other Land Use</i>   Agricultura, Florestas e outros usos da terra
BOF	<i>Basic Oxygen Furnace</i>   Forno básico de Oxigênio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CH <sub>4</sub>	Metano
ES	Espírito Santo
GEE	Gases de Efeito Estufa
GgCO <sub>2</sub> eq	Gigagramas de CO <sub>2</sub> equivalente
GtCO <sub>2</sub> eq	Gigatoneladas de CO <sub>2</sub> equivalente
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>   Painel Intergovernamental das Mudanças Climáticas
IPPU	<i>Industrial Processes and Product Use</i>   Processos Industriais e Uso de Produtos
Kg	Quilograma
LCOH	<i>Leved Cost of Hydrogen</i>   Custo Nivelado do Hidrogênio
LULUCF	<i>Land use, land-use change, and forestry</i>   Uso da Terra, Mudança de Uso da Terra e Florestas
MtCO <sub>2</sub> eq	Megatoneladas de CO <sub>2</sub> equivalente
N <sub>2</sub> O	Óxido Nitroso
OHF	Open Heart Furnace   <i>Fornos de regeneração aberta</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	15
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICOS .....	15
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>16</b>
3.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....	16
3.2	SETORES E FONTES .....	19
3.3	PANORAMAS, CENÁRIOS E DIAGNÓSTICO DO SETOR DE ENERGIA E INDÚSTRIA .....	21
3.3.1	Mundial .....	21
3.3.2	Nacional.....	22
3.3.3	Estadual.....	25
<b>4</b>	<b>MÉTODO .....</b>	<b>27</b>
4.1	INVENTÁRIO DE EMISSÕES .....	27
4.1.1	Setor Indústria.....	27
4.1.2	Dupla contagem nos setores de Energia e Indústria.....	29
4.2	AVALIAÇÃO DOS CUSTOS.....	31
4.2.1	Hidrogênio .....	31
4.2.2	Gás natural .....	32
4.2.3	Biomassa (Carvão Vegetal) .....	32
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
5.1	PROCESSO PRODUTIVO SIDERÚRGICO E EMISSÕES DE GEE.....	33
5.1.1	Coqueria .....	34
5.1.2	Sinterização.....	36
5.1.3	Pelotização .....	37

5.1.4	Alto-forno e aciaria .....	40
5.1.5	Compilado das emissões na siderurgia .....	42
5.2	FONTES RENOVÁVEIS DE COMBUSTÍVEL EM USINAS SIDERÚRGICAS: ESTIMATIVAS DOS NOVOS CONSUMOS.....	43
5.3	DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO ATUAL E CAPACIDADE FUTURA DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL .....	46
5.4	ESTIMATIVA DA EMISSÃO DE GEE A PARTIR DA SUBSTITUIÇÃO DAS FONTES .....	48
5.5	CUSTOS PARA APLICAÇÃO DAS NOVAS TECNOLOGIAS .....	49
6	CONCLUSÃO .....	52
	REFERÊNCIAS.....	54

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de geração de energia, ou setor energético, são impulsionados pela combustão dos combustíveis fósseis (como por exemplo, petróleo, gás natural e carvão mineral) na maioria das economias desenvolvidas (Santos & Ferreira Filho, 2017; IPCC, 2022).

Na combustão, o carbono e o hidrogênio são convertidos principalmente em dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), liberando a energia química da reação em forma de calor. Esse calor é normalmente utilizado de forma direta ou indireta na geração de eletricidade ou como energia motriz para os diversos meios de transporte (IPCC, 2006).

O dióxido de carbono resultante do processo de combustão de combustíveis fósseis é extremamente prejudicial para o meio ambiente, pois é um dos principais responsáveis pelo aumento do efeito estufa, e consequentemente, pelo aquecimento global e tragédias ambientais (Santos & Ferreira Filho, 2017).

O Efeito Estufa é um fenômeno natural que possibilita que a Terra tenha uma temperatura média compatível com a vida humana. O aquecimento se dá por meio da energia solar que chega ao planeta e é absorvida e refletida para o espaço. Quando existe um equilíbrio entre a energia solar incidente e a energia refletida, o clima se mantém (Brasil, 2020).

Entretanto este equilíbrio pode ser alterado devido à diversos fatores, dentre eles, a concentração de GEE na atmosfera, que bloqueiam a saída de uma parcela do calor que deveria ser irradiado para o espaço. O aumento da concentração desses gases ocorre devido à emissão exacerbada em atividades humanas e setores da economia, sendo o setor energético um importante produtor de GEE (Brasil, 2020). O setor energético contribui com mais de 90% das emissões de  $\text{CO}_2$  e 75% do total de emissões de GEE em países desenvolvidos (IPCC, 2006).

O Brasil caracteriza-se por uma matriz energética com alto percentual de energias renováveis. Devido à forte dependência histórica da importação de petróleo, o país teve que buscar fontes de energia alternativas às fontes importadas, como o álcool para o setor de transportes e o carvão vegetal no setor da siderurgia (Brasil, 2020).

Além disso, destaca-se a predominância de hidrelétricas no Brasil, representando cerca de 68% da geração de energia no país, em 2016 (EPE, 2020).

Porém, devido a necessidade de se alcançar uma autossuficiência energética cada vez mais consolidada, a produção doméstica de energia fóssil foi alavancada consideravelmente nos últimos anos (EPE, 2020). No Estado do Espírito Santo, esse processo de alavancagem na produção de energia também foi percebido a partir do ano de 2015, provocando um aumento de 31% para 48% em 2020 na utilização de combustíveis fósseis em relação às energias renováveis (ARSP, 2023).

Em relação ao consumo final energético em 2020, no Espírito Santo, pode-se observar que o setor industrial é o maior consumidor, representando cerca de 67% do total, seguido pelo setor de transportes, com 21,3%, setor energético com 10,95% e os demais setores (público, residencial, comercial e agropecuário) somados, totalizam 11,5% (ARSP, 2023).

Com isso, os setores industrial e de transportes demandam maior atenção no processo de mudança de combustíveis e fontes de geração de energia. O setor industrial é representado, majoritariamente, pelas atividades de siderurgia e processos de fabricação de aço, que utilizam como principal combustível o coque de carvão mineral e os gases oriundos desses processos, como o gás de coqueria, aciaria e alto-forno, sendo que alguns desses também são utilizados como agente redutor na produção do aço. Já o setor de transportes, é representado, principalmente, pelos caminhões e automóveis, e utiliza o óleo diesel e a gasolina como principais combustíveis, respectivamente (ARSP, 2023).

A partir da ciência da grande geração de GEE por estes combustíveis, são propostas diferentes ações com o objetivo de mitigação desse processo, como por exemplo o uso de biomassa ou gás natural, no lugar do coque de carvão mineral, no setor industrial, e o uso de etanol ou eletrificação da frota circulante, no setor de transportes (Reis Júnior *et al.*, 2022).

Sendo assim, o objetivo desse estudo é analisar a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis no setor da siderurgia no estado do Espírito Santo e seus impactos na geração de gases de Efeito Estufa.

Para isso, será realizado uma comparação entre diferentes cenários de geração de GEE a partir da manipulação de dados referentes ao consumo de combustíveis pelo setor industrial. Um dos cenários será o de referência, em que não serão considerados a adoção de combustíveis alternativos, enquanto os outros cenários poderão variar de acordo com a mudança do consumo de combustíveis a ser realizada. Com isso, poderão ser observadas quais combustíveis tendem a reduzir a geração de GEE com maior impacto e, se serão atendidas as necessidades de consumo, permitindo um desenvolvimento mais sustentável do setor energético estadual.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Analisar a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis no setor siderúrgico do estado do Espírito Santo e seus impactos na geração de gases de Efeito Estufa.

### **2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS**

- Realizar diagnóstico da situação atual e capacidade futura de geração de energia renovável como oportunidade de substituição dos combustíveis fósseis em usinas siderúrgicas e como fonte de energia para produção de hidrogênio;
- Apresentar o processo produtivo siderúrgico evidenciando a origem das emissões de GEE em cada etapa com destaque para a o balanço de massa de cada etapa, combustíveis utilizados e produção de aço associada;
- Identificar os possíveis combustíveis que podem substituir os fósseis no processo de redução para diferentes tipos de usinas siderúrgicas, estimar os novos consumos e custos associados;
- Estimar a redução da emissão de GEE a partir da substituição das fontes.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

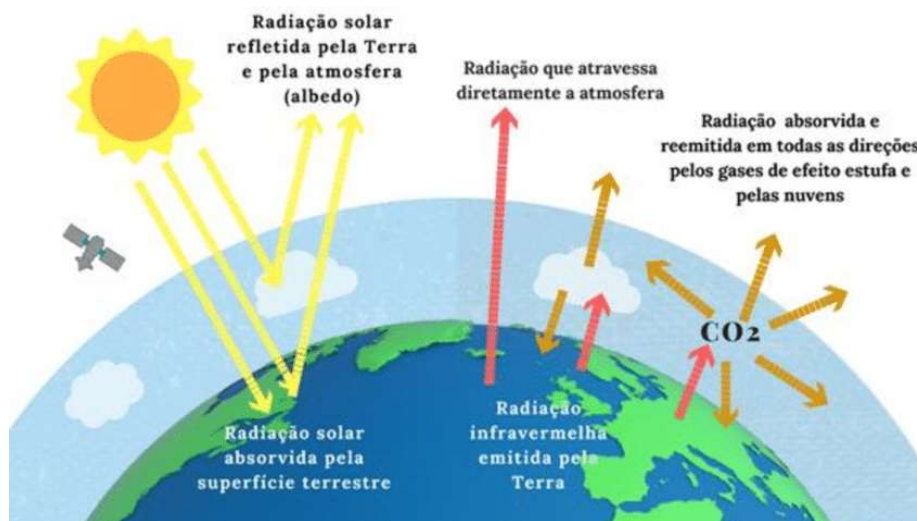
#### **3.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

O planeta Terra mantém a temperatura média da sua atmosfera e superfície por meio de um fenômeno natural chamado de Efeito Estufa. Esse fenômeno ocorre a partir da incidência de energia proveniente do sol em forma de uma radiação composta por ondas eletromagnéticas curtas, no comprimento de onda do ultravioleta, na atmosfera terrestre. Nesse processo, em torno de 6% é refletido na atmosfera de volta para o espaço, e outros 10% são refletidos na superfície terrestre e oceânica. A fração restante de 84% é absorvida para aquecimento da superfície (Houghton, 2015).

De modo a manter o balanço energético desse processo, a Terra tem que irradiar essa mesma quantidade de energia de volta para o espaço na forma de radiação térmica, composta por ondas eletromagnéticas longas, no comprimento de onda do infravermelho. A irradiação vai depender principalmente da temperatura da superfície e o seu respectivo grau de absorbância, sendo que quanto mais quente a temperatura da superfície e maior o seu grau de absorbância, maior será a irradiação (Houghton, 2015).

Os principais gases presentes na atmosfera, oxigênio e nitrogênio, não absorvem nem emitem a radiação térmica emitida pela superfície terrestre. São os vapores de água, dióxido de carbono e outros gases presentes na atmosfera em menor quantidade que absorvem essa radiação, promovendo o aquecimento da atmosfera. Por isso, esses gases são chamados de GEE e auxiliam no manutenção da temperatura média global de 15°C, ao invés de -6°C, que seria na ausência deles (Houghton, 2015).

Figura 1 – Esquematisação do efeito estufa natural

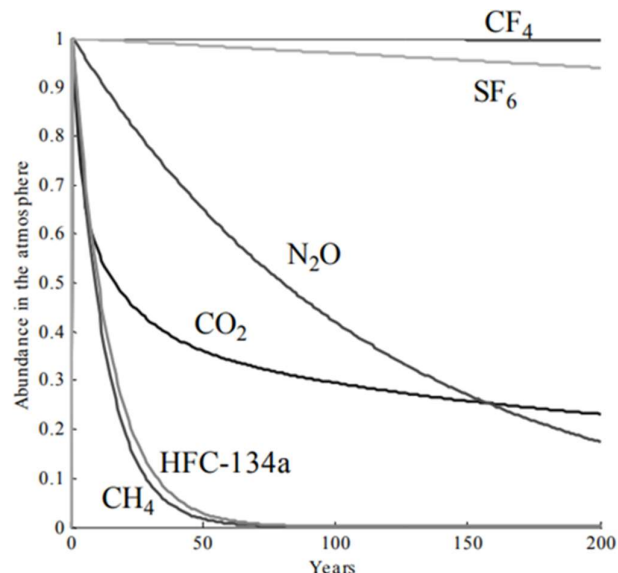


Fonte: Junges *et al.*, 2019.

O CO<sub>2</sub> é o gás que mais tem aumentado a concentração na atmosfera nos últimos anos a partir das atividades antrópicas, contribuindo com cerca de 74% do aumento do efeito estufa até hoje, sendo seguido por 19% do gás metano (CH<sub>4</sub>) e 7% do gás óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Esse aumento do CO<sub>2</sub> é devido principalmente à queima de combustíveis fósseis para geração de energia sendo potencializado a partir da revolução industrial no século XVIII. A queima de combustíveis fósseis altera o ciclo natural de carbono no planeta, retirando carbono de estoques geológicos subterrâneos, fazendo com que a capacidade de absorção natural desse composto na natureza seja afetada (Houghton, 2015).

É importante comparar a forçagem radiativa gerada pelos diferentes GEE, pois por possuírem diferentes meia-vidas, o impacto futuro provocado por cada um deles será diferente.

Figura 2 – Decaimento de alguns dos gases do efeito estufa presentes na atmosfera.



Fonte: UNFCCC, 2004.

Por esse motivo, foi elaborado o *Global Warming Potential* - Potencial de Aquecimento Global (GWP), um índice que indica a medida do efeito radiativo relativo de uma determinada substância em comparação com outra, integrada ao longo de um horizonte de tempo escolhido. Essa comparação normalmente é feita entre um quilo de um determinado gás com um quilo de CO<sub>2</sub> (gás de referência), em um horizonte de 100 anos. De acordo com uma das decisões tomadas na Conferência das Partes, que ocorreu em Kyoto, em 1997, o GWP utilizado deve ser o indicado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (UNFCCC, 2004).

Figura 3 – Global Warming Potential (GWP) - valores relativos ao CO<sub>2</sub>

Industrial designation or common name	Chemical formula	GWP values for 100-year time horizon		
		Second Assessment Report (SAR)	Fourth Assessment Report (AR4)	Fifth Assessment Report (AR5)
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	1	1	1
Methane	CH <sub>4</sub>	21	25	28
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	310	298	265

Fonte: Myhre *et al.*, 2013.

### 3.2 SETORES E FONTES

No estudo da emissão de GEE, o IPCC recomenda a organização do inventário de acordo com os principais setores, sendo: Energia, Processos Industriais e Uso de Produtos, AFOLU e setor Resíduos.

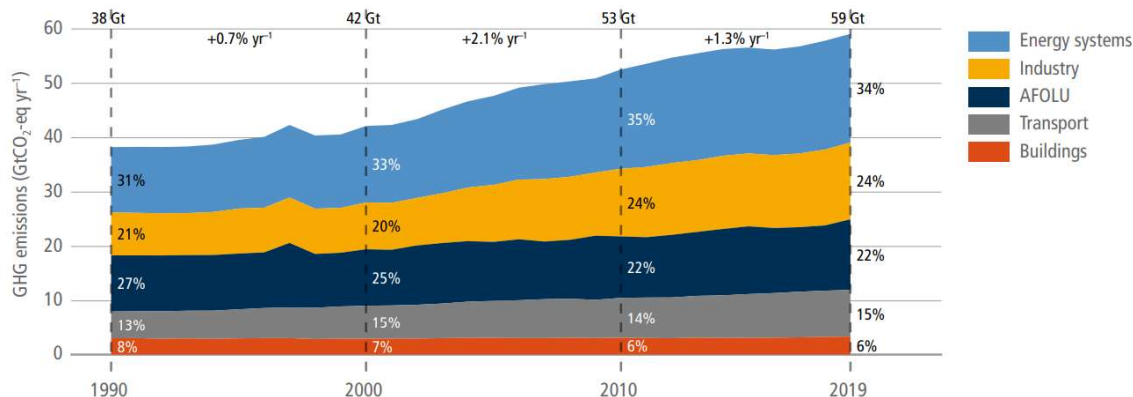
O setor Energia é subdividido em Combustão Estacionária, Combustão Móvel e Emissões Fugitivas. O primeiro é responsável por analisar as emissões dos diversos tipos de veículos, sejam terrestres, marítimos, aéreos ou ferroviários. O segundo, pelas emissões de fontes pontuais de queima de combustível. E o terceiro, pelas emissões nos setores de extração de petróleo e de minerais (IPCC, 2006).

O setor Processos Industriais e Uso de Produtos englobam a emissão de GEE que ocorrem nos processos industriais por meio do uso desses gases nos produtos, e pelos usos não energéticos dos combustíveis fósseis. As principais fontes de emissão são de processos que transformam os materiais quimicamente ou fisicamente (IPCC, 2006).

O Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa segue uma organização parecida com a indicada pelo IPCC. Porém, como o Brasil tem um território extenso com diferentes usos do solo e vegetação, o Ministério da Ciência e Tecnologia optou por separar o setor Agricultura do setor Florestas e Uso da Terra, mantendo os demais setores na organização do IPCC (Brasil, 2021).

O Espírito Santo desenvolveu um Plano de Descarbonização, com o objetivo de facilitar as análises e discussões por setor de atividade, sistematizando a análise de resultados e as proposições de políticas e estratégias para atingir os objetivos pretendidos dentro de cada atividade econômica. O plano organizou os setores em: Energia e Indústria, Transportes, Resíduos e AFOLU (Reis Júnior *et al.*, 2022).

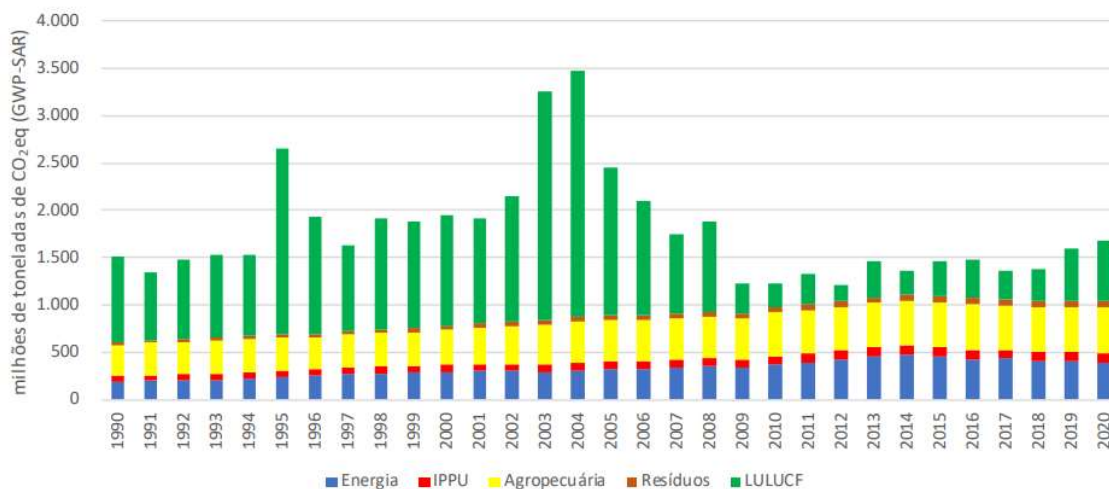
No estudo *Mitigation of Climate Change*, observou-se que foi emitido globalmente cerca de 59 GtCO<sub>2</sub>eq, em 2019. Desse total, o setor que mais que mais contribuiu para as emissões de GEE foi o de Energia, com 34% de participação nas emissões totais. O subsetor de geração de eletricidade e calor representaram cerca de 68%, utilizados principalmente pelas indústrias e construção civil (IPCC, 2022).

Figura 4 – Emissão mundial de GEE por setor, em GtCO<sub>2</sub>eq

Fonte: IPCC, 2022.

Segundo dados do 6º Relatório de Estimativas Anuais, constatou-se que no ano de 2020, o Brasil emitiu cerca de 1.675,76 MtCO<sub>2</sub>eq, 13,7% maiores quando comparadas às emissões de 2016. Os principais setores, LULUCF, Agropecuária e Energia, tiveram participação de 38,0%, 28,5% e 23,2%, respectivamente. O Brasil apresenta uma característica diferente das emissões globais, sendo que os setores que mais emitem GEE são LULUCF e Agropecuária, e não o Energia e Indústria (Brasil, 2022).

Figura 5 – Emissão nacional de GEE por setor



Fonte: Brasil, 2022.

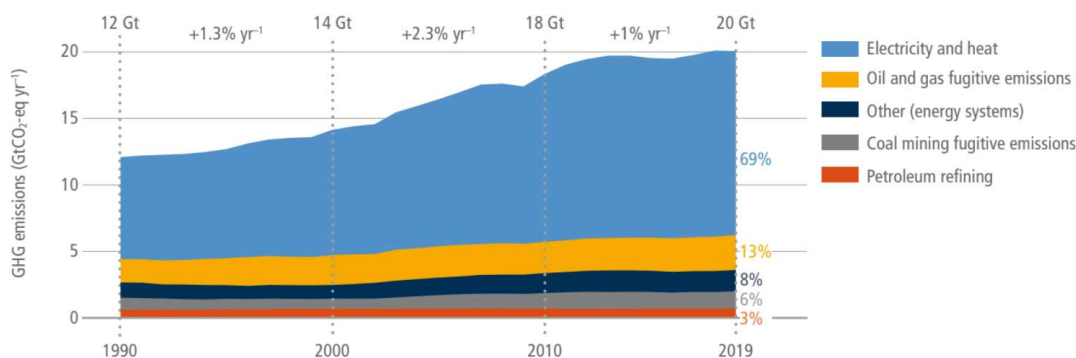
### 3.3 PANORAMAS, CENÁRIOS E DIAGNÓSTICO DO SETOR DE ENERGIA E INDÚSTRIA

#### 3.3.1 Mundial

As emissões do setor Energia tiveram uma redução na taxa de crescimento no período de 2010 a 2019, quando comparado de 2000 a 2009. Porém, o uso de petróleo e de gás continuam crescendo e o setor continua sendo o maior contribuidor para a emissão de GEE em 2019, com 20 GtCO<sub>2</sub>eq, aproximadamente 34% do total anual (IPCC, 2022).

A maior parte dos 14 GtCO<sub>2</sub>eq provenientes da geração de eletricidade e calor (23% das emissões globais de GEE em 2019) ocorreu devido ao uso de energia na indústria e em edifícios, tornando esses dois setores alvos proeminentes para a mitigação (IPCC, 2022).

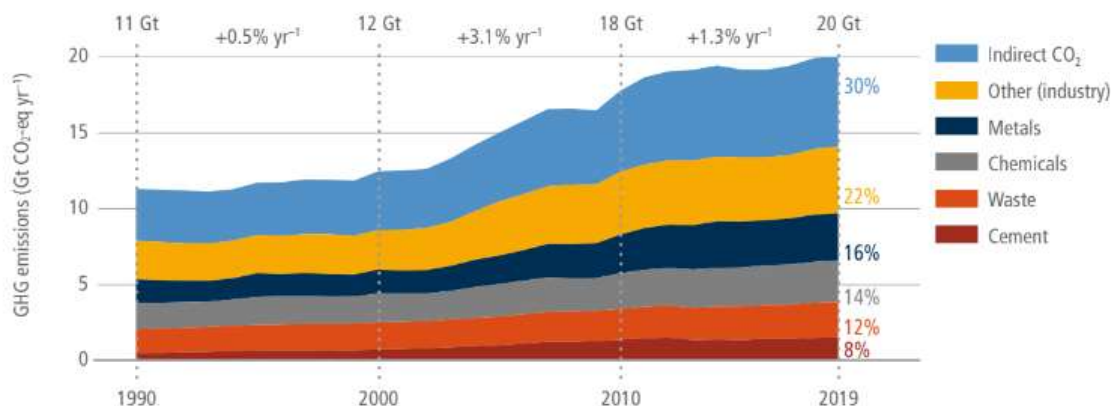
Figura 6 – Distribuição das emissões no setor Energia



Fonte: IPCC, 2022.

Quando as emissões indiretas da produção de eletricidade e calor são incluídas, a indústria se torna o setor que mais emite GEE. O principal causador do aumento das emissões tem sido o crescimento na demanda de produtos usados indiretamente no processo de fabricação, como cimento, produtos químicos, aço, alumínio, madeira, papel, plásticos, lubrificantes, fertilizantes, entre outros. Essa demanda foi impulsionada pelo crescimento econômico e aumento do consumo, bem como pelo rápido crescimento das populações urbanas e desenvolvimento de infraestrutura (IPCC, 2022).

Figura 7 – Emissões de GEE no setor Industrial por subsetores



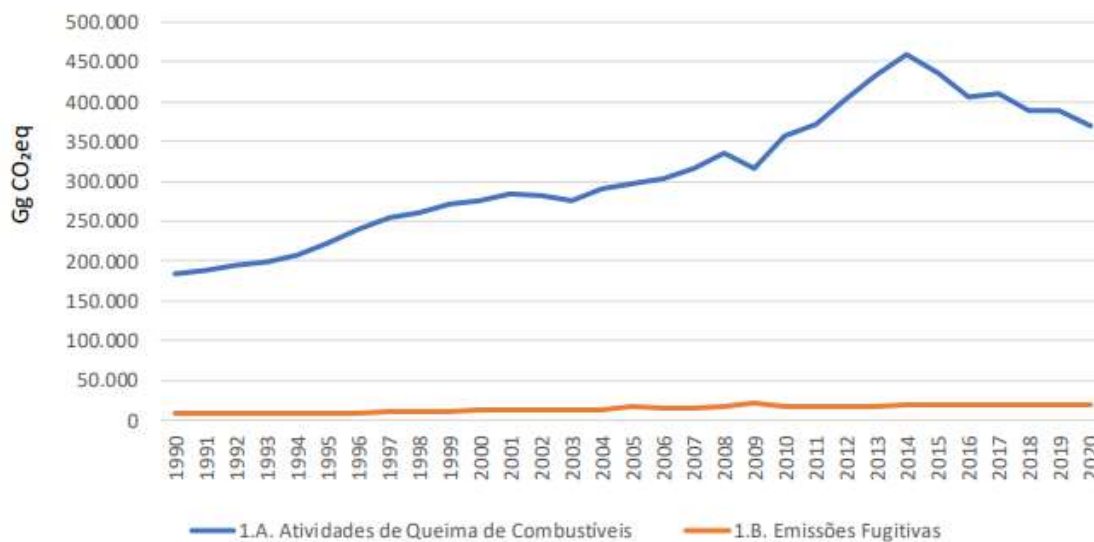
Fonte: IPCC, 2022.

### 3.3.2 Nacional

De acordo com o relatório das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa, o setor Energia contabilizou 389.484 GgCO<sub>2</sub>eq em 2020, representando cerca de 23,2% do total das emissões brasileiras, sendo que desse total, 94,4% são de gás carbônico. Em relação a 2016, as emissões do setor foram 8,3% menores (Brasil, 2022).

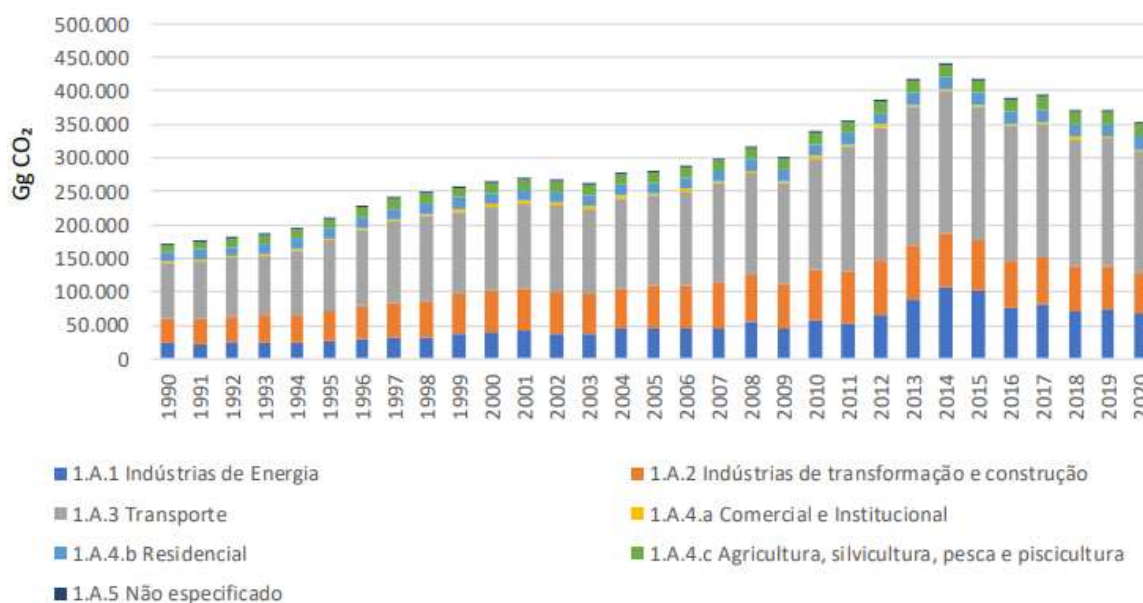
O decréscimo das emissões que se deu a partir de 2014, conforme a figura 8, pode ser explicado pela recessão econômica enfrentada pelo país a partir deste ano, provocando uma diminuição da atividade industrial e redução no consumo de combustíveis fósseis no transporte rodoviário. Já em 2020, dada a pandemia de COVID-19, observou-se uma redução de 2% consumo energético do país, comparado ao ano anterior (Brasil, 2022).

Figura 8 – Emissões de GEE por atividade no Brasil



Fonte: Brasil, 2022.

A partir da figura 9, pode-se perceber que o subsetor de Queima de Combustíveis Fósseis é o grande responsável pelas emissões de GEE no setor Energia, com 95,1% em 2020. A categoria que mais contribuiu nas emissões foi a de Transporte, com, aproximadamente, 45% do total do subsetor.

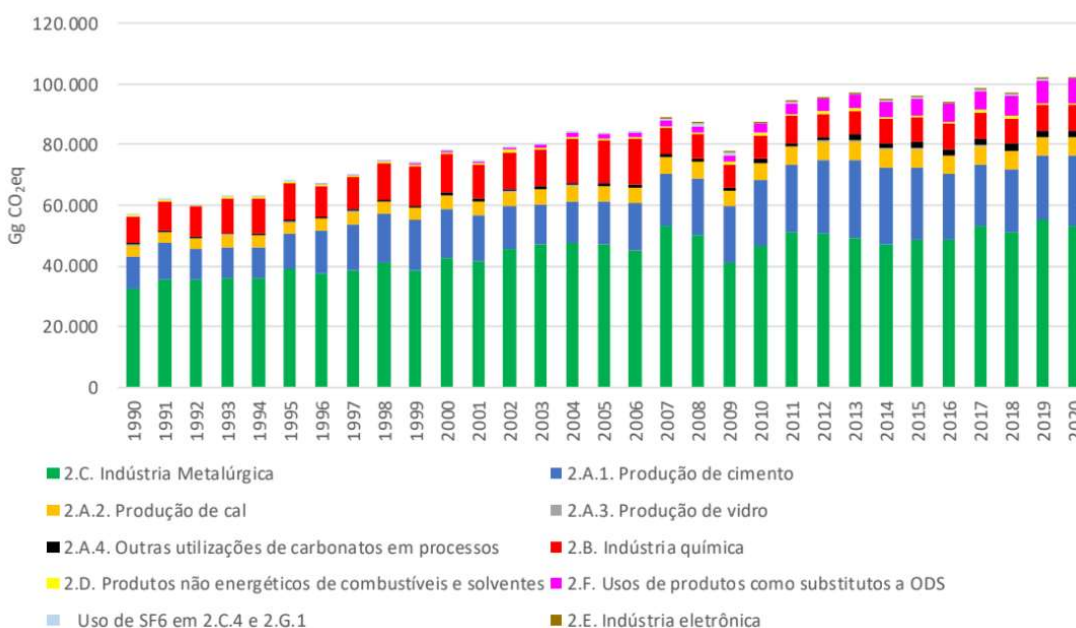
Figura 9 – Emissões de CO<sub>2</sub> do subsetor Atividade de Queima de Combustíveis por categoria

Fonte: Brasil, 2022.

Em 2016, o modal rodoviário participou em 46% das emissões totais da categoria “Transportes”, com ônibus e caminhões representando 26% das emissões. Esses veículos utilizam óleo diesel como principal combustível, podendo emitir mais de 1000 gramas de CO<sub>2</sub> por quilômetro, sendo esses veículos podem percorrer, em média, até 110 mil quilômetros por ano (Brasil, 2022).

O setor IPPU emitiu 101.936 GgCO<sub>2</sub>eq em 2020, o que significam 6,1% das emissões nacionais nesse ano. Esse valor representa um crescimento de 8,8% em relação a 2016, devido, principalmente, ao aumento nas emissões dos dois principais subsectores, Indústria Metalúrgica e Produção de Cimento, 52,1% e 22,7% do total do setor, respectivamente (Brasil, 2022).

Figura 10 – Emissões do setor IPPU de 1990 a 2020



Fonte: Brasil, 2022.

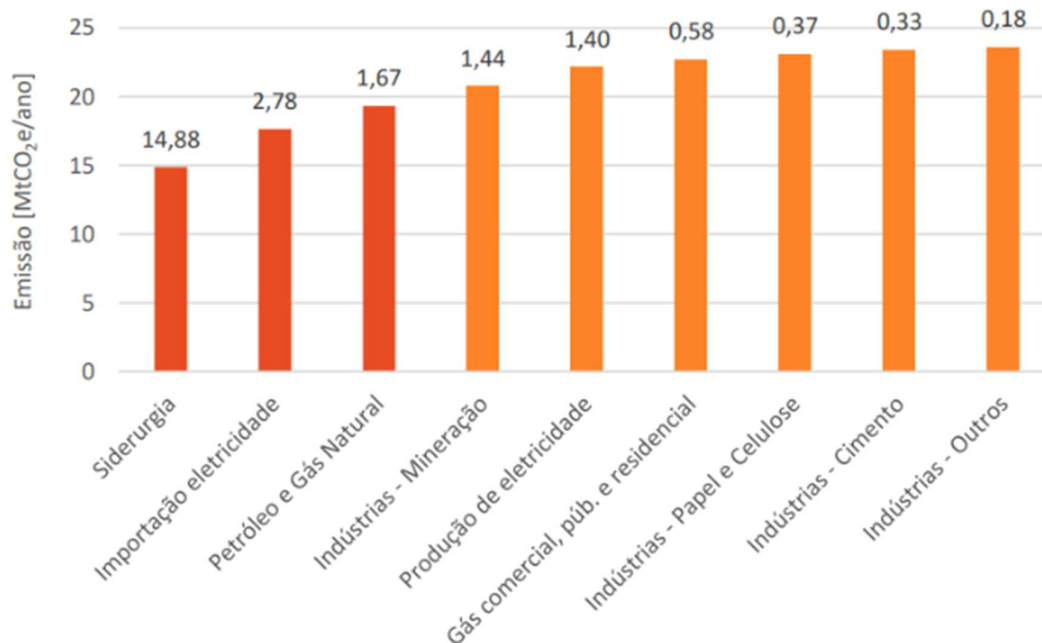
Em 2016, a produção mundial de aço bruto totalizou 1,629 bilhão de toneladas, sendo a China líder mundial, com 808,4 megatoneladas. Nesse ano, a produção brasileira de aço bruto totalizou 31,3 megatoneladas, apresentando uma queda de 6% em relação ao ano anterior. O Brasil tem a 9ª posição do ranking mundial, mas mantém a liderança na América Latina (Brasil, 2020).

### 3.3.3 Estadual

No Plano de Descarbonização e Neutralização das Emissões de GEE do Espírito Santo de 2022, o setor de Energia e IPPU, definidos pelo IPCC, estão organizados de forma unificada no setor Energia e Indústria. Esse setor foi responsável por emitir cerca de 22,19 MtCO<sub>2</sub> no ano de 2021, representando grande parte das emissões estaduais totais (Reis Júnior *et al.*, 2022).

Os principais grupos geradores de GEE do setor Energia e Indústria são: Siderurgia, Eletricidade (produção e importação), Petróleo e Gás, Indústria de Mineração e Consumo de Gás. A maior parcela das emissões está relacionada à Siderurgia, sendo responsável por 14,88 MtCO<sub>2</sub>eq, cerca de 63,5% das emissões do setor no Espírito Santo (Reis Júnior *et al.*, 2022).

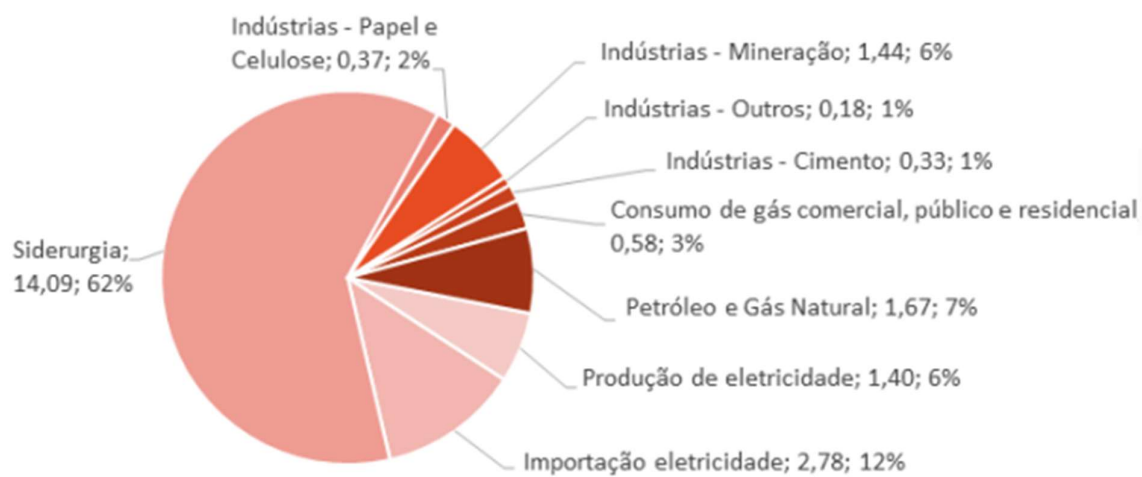
Figura 11 – Emissões acumuladas nos principais subsectores gerados de GEE no ES



Fonte: Reis Júnior *et al.*, 2022.

Conforme observado na figura 12, o subsector siderurgia representa mais que a metade (62%) das emissões de GEE no Espírito Santo, sendo um importante alvo para o investimento em estratégias de mitigação das emissões.

Figura 12 - Inventário de emissões de GEE do ES em MtCO<sub>2</sub>eq/ano e participação percentual de cada subsetor do setor Energia e Indústria, ano base 2021



Fonte: Reis Júnior *et al.*, 2022.

## 4 MÉTODO

### 4.1 INVENTÁRIO DE EMISSÕES

#### 4.1.1 Setor Indústria

Em 2006, o IPCC elaborou um guia para elaboração de inventários, dividido em 5 volumes, GGR (*General Guidance and Reporting* – Orientação Geral e Relatórios), *Energy*, IPPU, AFOLU e *Waste*. Para a estimativa de geração de GEE no setor Indústria, foi utilizado o volume 3 do guia, que se refere ao IPPU. No presente trabalho, o setor industrial abordado é o de código e nome 2C – Indústria do Metal e dois de seus subsetores; 2C1 – Produção de Ferro e Aço, haja visto que são os principais emissores de GEE do ES.

Os cálculos das estimativas de emissões de GEE são divididos em três níveis de complexidade (*Tier* 1, 2 e 3). O nível de complexidade deve ser aplicado considerando a representatividade de emissões de cada setor, sendo que os de maior representatividade devem assumir maiores níveis de detalhamento. Entretanto, considerando que não foi possível obter dados específicos sobre o processo de produção na siderurgia do estado do ES, foi utilizado o *Tier* 1 em todas as equações.

A equação 1, se refere à produção de coque, sendo recomendado a alocação dessa emissão no setor Energia.

$$E_i = Coke * EF_i \quad (1)$$

Onde:

- $E_i$  = emissão do gás i, CO<sub>2</sub> ou CH<sub>4</sub>, da produção de coque, em toneladas;
- $Coke$  = quantidade de coque produzido, em toneladas;
- $EF_i$  = fator de emissão, em tonelada de gás/tonelada de coque produzido.

Esse método assume que todos os subprodutos do forno de coque são transferidos para outro lugar, e o gás de coqueria gerado no processo é reaproveitado energeticamente.

As equações a seguir se referem à geração de CO<sub>2</sub> nos demais processos não energéticos de produção do ferro e aço, indicadas no guia do IPCC.

$$\text{Produção de Ferro e aço: } E_{CO^2} = BOF * EF_{BOF} + EAF * EF_{EAF} + OHF * EF_{OHF} \quad (2)$$

$$\text{Produção de Ferro-gusa: } E_{CO^2} = IP * EF_{IP} \quad (3)$$

$$\text{Produção de sinter: } E_{CO^2} = SI * EF_{SI} \quad (4)$$

$$\text{Produção de pelota: } E_{CO^2} = P * EF_P \quad (5)$$

Onde:

- $E_{CO^2}$  = emissão de CO<sub>2</sub> a ser reportado no setor IPPU, em toneladas;
- $BOF$  = quantidade de BOF aço bruto produzido, em toneladas;
- $EAF$  = quantidade de EAF aço bruto produzido, em toneladas;
- $OHF$  = quantidade de OHF aço bruto produzido, em toneladas;
- $IP$  = quantidade de ferro-gusa produzido e não convertido em aço, em toneladas;
- $SI$  = quantidade de sinter produzido, em toneladas;
- $P$  = quantidade de pelotas produzidas, em toneladas;
- $EF$  = fator de emissão, em toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada produzida, para cada processo.

Os valores utilizados referentes aos fatores de emissão de CO<sub>2</sub> para produção de coque, sinter, pelotas, ferro-gusa e aço constam no quadro a seguir.

Quadro 1 – Fatores de Emissão de CO<sub>2</sub> para produção de coque e produção de ferro e aço

<b>Tier 1 – Fatores de Emissão de CO<sub>2</sub> para produção de coque e produção de ferro e aço</b>	
<b>Processo</b>	<b>Fator de Emissão</b>
Produção de sínter (tonelada de CO <sub>2</sub> por tonelada de sínter produzido)	0,20
Coqueria (tonelada de CO <sub>2</sub> por tonelada de coque produzido)	0,56
Produção de ferro-gusa (tonelada de CO <sub>2</sub> por tonelada de ferro-gusa produzido)	1,35
Produção de pelotas (tonelada de CO <sub>2</sub> por tonelada de pelotas produzidas)	0,03
<b>Método de produção de aço</b>	
BOF (tonelada de CO <sub>2</sub> por tonelada de aço produzido em BOF)	1,46
OHF (tonelada de CO <sub>2</sub> por tonelada de aço produzido em OHF)	1,72

Fonte: Elaborado pelo autor (adaptado de IPCC, 2006).

#### 4.1.2 Dupla contagem nos setores de Energia e Indústria

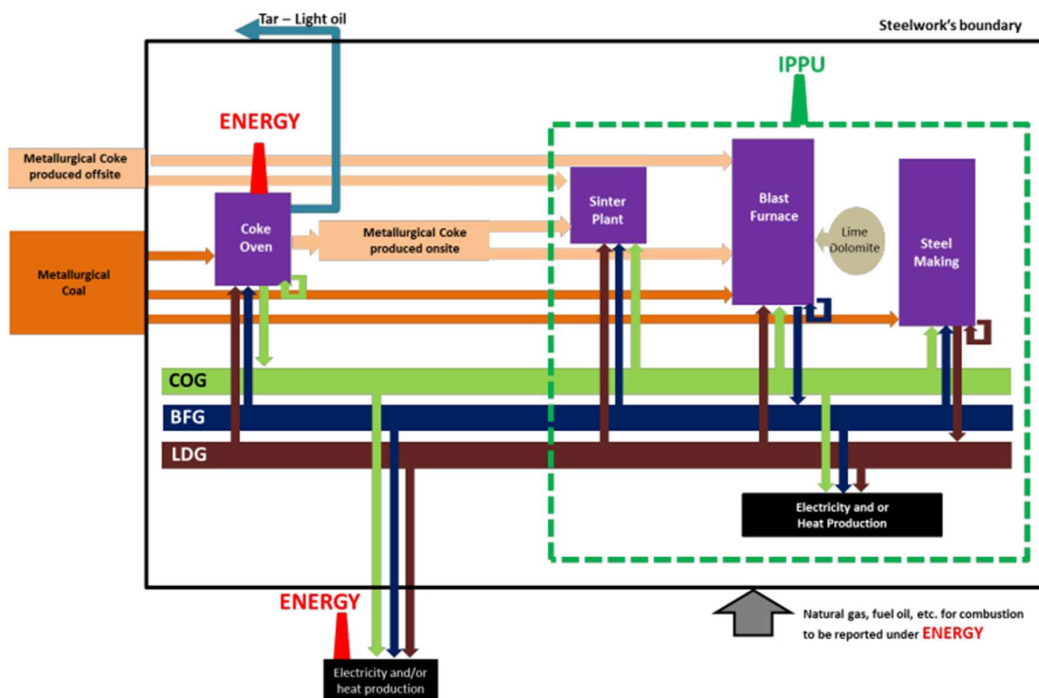
Ao estimar as emissões das categorias produção de coque (setor Energia) e produção de ferro e aço (setor IPPU), há o risco de ocorrer dupla contagem ou omissão dos resultados tanto em um setor, quanto no outro. Uma vez que as principais fontes de carbono (coque, carvão, óleo, gás natural, calcário etc.) são utilizadas na produção de ferro-gusa, as emissões do processo de produção do ferro e aço, incluindo o processo de sinterização, são consideradas emissões do processo industrial (IPCC, 2006).

Para a produção integrada de ferro e aço com produção de coque na mesma planta, pode haver fluxos de subprodutos como o gás de forno de coque e o gás de alto-forno. Esses gases provenientes da planta de produção de coque e da planta de produção de ferro e aço, respectivamente, criam possíveis problemas de dupla contagem (IPCC, 2006).

O carbono consumido na forma de gás de forno de coque em uma instalação de produção de ferro e aço e as emissões resultantes são categorizadas como emissões IPPU. O carbono consumido na forma de gás de alto-forno em uma

instalação de produção de coque e as emissões resultantes são categorizadas como emissões de Energia (IPCC, 2006). A desagregação indicada pelo IPCC é apresentada na figura 13.

Figura 13 – Desagregação das emissões na siderurgia para os setores Energia e Indústria



Fonte: IPCC, 2006.

Uma estratégia adotada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações no inventário nacional, é considerar os combustíveis, coque de petróleo, carvões betuminosos, coque de carvão mineral e carvão vegetal como agente redutor, cujo uso final, de acordo com o Balanço de Energia Útil, se dá em Aquecimento Direto e que são utilizados na indústria de ferro-gusa e aço, ferroligas e não ferrosos (BRASIL, 2020).

Na elaboração dos inventários devem ser realizados a devida alocação das emissões, distinguindo-se os setores energéticos e industrial de modo a possibilitar um melhor manuseio dos dados em passos futuros.

## 4.2 AVALIAÇÃO DOS CUSTOS

### 4.2.1 Hidrogênio

A ferramenta utilizada para estimar o custo da produção de hidrogênio é o índice *Leved Cost of Hydrogen (LCOH)*, ou Custo Nivelado do Hidrogênio. O método é utilizado para contabilizar todos os custos operacionais e de capital da produção do hidrogênio, ou seja, o custo de produção para atingir o capital do projeto. De acordo com o LCOH elaborado pela *Clean Energy Latin America*, o custo médio para a produção do hidrogênio no Brasil em 2023 foi de 2,87 a 3,56 US\$/kg (CELA, 2023).

O hidrogênio pode possuir uma elevada emissão de CO<sub>2</sub> para atmosfera quando produzido a partir do carvão mineral. Entretanto, é possível empregar diferentes processos de produção que reduzem seu potencial de emissão de GEE. Quando obtido por meio da eletrólise da água, a emissão é neutra e classifica-se como hidrogênio verde (Reis Júnior *et al.*, 2022).

Figura 14 – Classificação dos principais tipos de hidrogênio em escala de cores

Classificação	Descrição
hidrogênio preto	produzido de carvão mineral (antracito) sem CCUS
hidrogênio marrom	produzido de carvão mineral (hulha), sem CCUS
hidrogênio cinza	produzido do gás natural sem CCUS
hidrogênio azul	produzido a partir de gás natural (eventualmente, também a partir de outros combustíveis fósseis) com CCUS*
hidrogênio turquesa	produzido por craqueamento térmico do metano, sem gerar CO <sub>2</sub> *
hidrogênio verde	produzido a partir de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar) via eletrólise da água
hidrogênio musgo	produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica**

\* A produção de hidrogênio azul ou turquesa não pode ser considerada totalmente isenta de emissões, visto que existem emissões fugitivas significativas, principalmente no estágio atual de maturação da tecnologia.

\*\* Produção de hidrogênio a partir de biocombustíveis associada ao emprego de CCUS para captura do CO<sub>2</sub> resultante do processo pode levar a emissão negativa.

Fonte: Reis Júnior *et al.*, 2022.

De acordo com El-Shafie (2023), as três principais tecnologias de obtenção do gás pela são hidrólise: eletrólise PEM (uso de água pura), eletrólise alcalina e a eletrólise direta da água do mar. Os gastos energéticos e as eficiências de cada processo são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Tecnologias de obtenção do hidrogênio pela eletrólise

<b>Tecnologia</b>	<b>Consumo de energia (kWh/kgH<sub>2</sub>)</b>	<b>Eficiência (%)</b>
Eletrólise PEM	47-63	67-82
Eletrólise alcalina	47-66	62-82
Eletrólise direta da água do mar	50-53	75-79
<b>Média</b>	<b>54</b>	<b>74</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.2 Gás natural

Para o cálculo da estimativa do custo de gás natural, foram utilizados os valores médios do gás no estado do Espírito Santo, dispostos na resolução nº 075/2024, da Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo (ARSP/ES).

Figura 15 – Tarifas do gás natural canalizado da companhia de gás do Espírito Santo

<b>Segmento Industrial</b>				
<b>Classe</b>	<b>Valor Mensal (m³)</b>	<b>Valor Fixo (R\$)</b>	<b>Valor Variável (R\$/m³)</b>	
1	-	1.000,00	84,83	4,4943
2	1.000,01	5.000,00	863,31	3,7159
3	5.000,01	50.000,00	4.331,87	3,0222
4	50.000,01	300.000,00	6.852,40	2,9717
5	300.000,01	500.000,00	17.056,62	2,9377
6	500.000,01	1.000.000,00	33.976,44	2,9039
7	1.000.000,01	10.000.000,00	50.896,26	2,8870
8	Acima de 10.000.000,00	-	511.394,35	2,8409

Fonte: ARSP/ES, 2024.

#### 4.2.3 Biomassa (Carvão Vegetal)

Para o cálculo da estimativa do custo de carvão vegetal, foi utilizado o valor médio estimado de 54,2 US\$/m³, ou 0,22 US\$/kg, referente ao ano de 2019. Este valor consta no Balanço Energético Nacional, do ano base 2022, elaborado pela Empresa

de Pesquisa Energética (EPE), que utilizou a cotação de indústrias de vários estados para o cálculo da média (EPE, 2022).

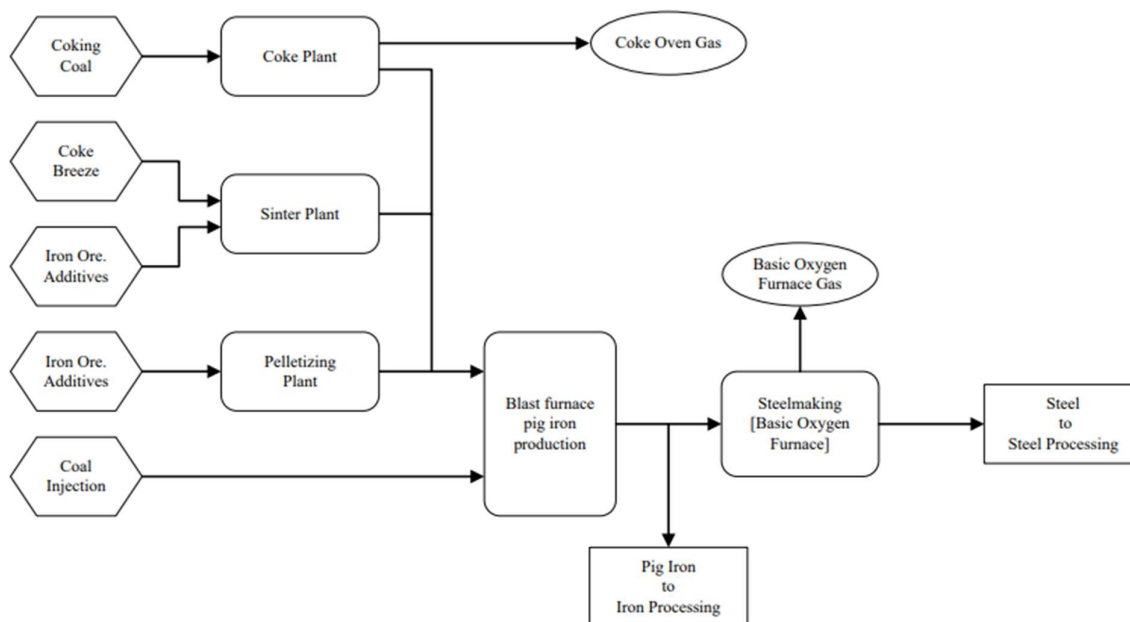
## 5 RESULTADOS

### 5.1 PROCESSO PRODUTIVO SIDERÚRGICO E EMISSÕES DE GEE

A produção de aço pode ocorrer em instalações integradas a partir de minério de ferro ou em instalações secundárias, que produzem aço, principalmente, por meio de sucata de aço reciclada. As instalações integradas normalmente incluem a produção de coque, altos-fornos e fornos de oxigênio básico (*BOF* – do inglês *Basic Oxygen Furnace*), ou, em alguns casos, fornos de regeneração aberta (*OHF* – do inglês *Open Heart Furnace*) (IPCC, 2019).

As principais etapas do processo de fabricação do aço pela rota do alto-forno e forno de oxigênio básico (BF-BOF) podem ser observadas na figura 16, sendo elas: produção de coque, produção de sínter, produção de pelotas, produção de ferro-gusa e produção de aço.

Figura 16 – Etapas da produção integrada de ferro e aço

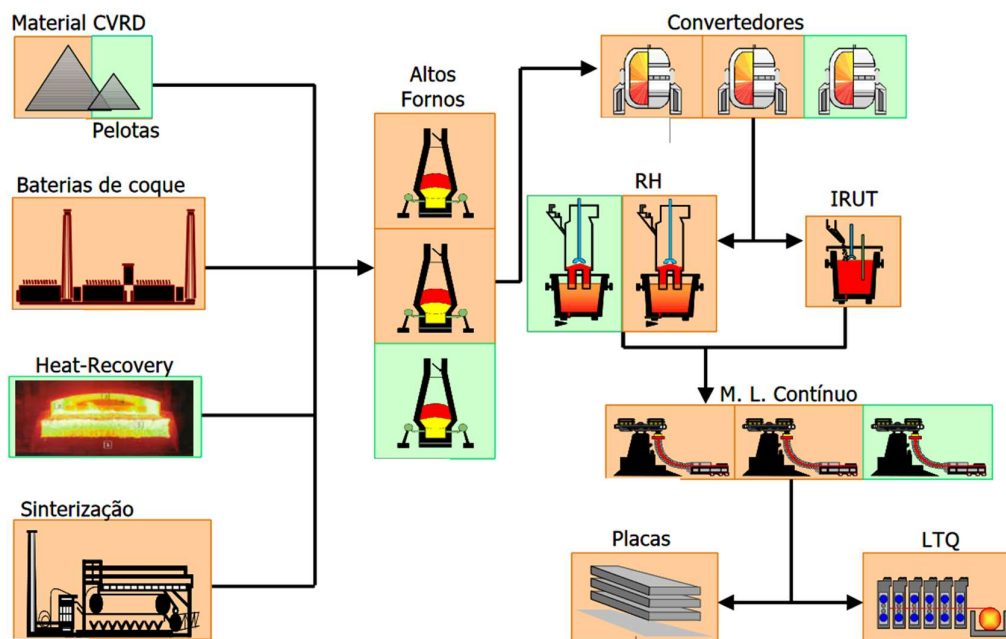


Fonte: IPCC, 2006.

Os dados utilizados no presente estudo sobre o processo siderúrgico do Espírito Santo foram obtidos por meio do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) do Projeto de Expansão do Complexo Siderúrgico de Tubarão, atual Arcelor Mittal (Cepemar, 2003), à exceção da etapa da pelletização, que foi obtido por meio do Relatório de produção e vendas da Vale 4T22 e 2022 (VALE, 2023a). A produção de aço total do projeto apresentado no RIMA de 7,5Mt/ano continua sendo a atual, conforme indicado no site da empresa (Arcelor Mittal, 2024).

Por meio desses documentos, pôde-se observar que o processo siderúrgico presente no ES (Figura 17) segue as etapas da produção integrada apresentadas na Figura 16.

Figura 17 – Fluxograma do processo de produção de aço



Fonte: Cepemar, 2003.

### 5.1.1 Coqueria

O coque metalúrgico é um produto sólido, de baixo teor de umidade e matéria volátil, obtido em alta temperatura a partir da carbonização do carvão mineral, principalmente do carvão betuminoso. Este carvão permite a produção de um coque

capaz de suportar a carga de um alto-forno (Mourão *et al.*, 2007; Pinto Júnior *et al.*, 2018).

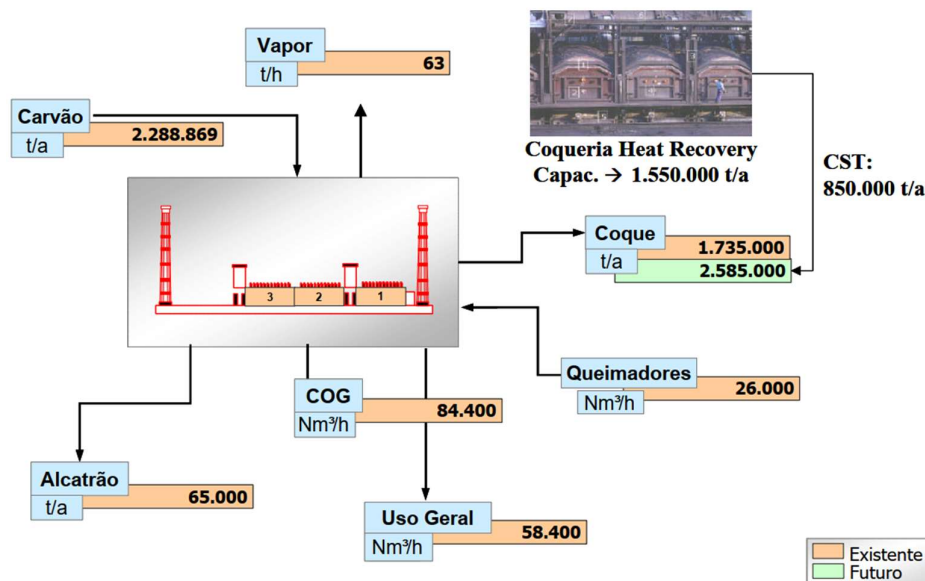
O coque é utilizado em alto-forno para fabricação de ferro, e é empregado em outros processos metalúrgicos, como na fabricação de ferro fundido, ferroligas, chumbo e zinco, bem como em fornos para a produção de cal e magnésio (Mourão *et al.*, 2007; Pinto Júnior *et al.*, 2018).

O gás de coqueria é um subproduto da fabricação de coque metalúrgico para a produção de ferro e aço. Esse gás pode ser queimado para aquecer as coquerias ou transferido para uma usina integrada de ferro e aço, sendo utilizado na produção de sinter ou em processos de produção de ferro (Mourão *et al.*, 2007; Pinto Júnior *et al.*, 2018).

A combustão do coque em altos-fornos durante o processo de fabricação de ferro e aço gera gás de alto-forno, que pode ser recuperado e transferido da siderúrgica para a coqueria no local, onde é queimado para aquecer as coquerias ou utilizado na produção de sinter. A combustão de gás de alto-forno e gás de coqueria é a principal fonte de emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> na produção de coque (Mourão *et al.*, 2007).

No fluxo de massa da coqueria (figura 18), as massas envolvidas nesse processo são utilizadas como dado de entrada para o cálculo das emissões de GEE do setor Indústria.

Figura 18 – Fluxo de massa da coqueria



Fonte: Cepemar, 2003.

Utilizando o fator de emissão 0,56 (quadro 1) e a equação 1, apresentados no item 4.1.1, referentes à produção de coque, a emissão de GEE proveniente da produção de 2.585.000 toneladas de coque será de 3.179.550 toneladas de CO<sub>2</sub>.

### 5.1.2 Sinterização

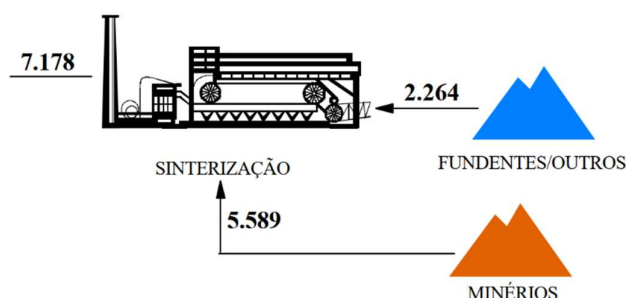
O minério de ferro e outros materiais que contêm ferro podem ser aglomerados em plantas de sinterização em usinas integradas de ferro e aço antes de serem introduzidos no alto-forno. A matéria-prima para plantas de sinterização pode incluir minérios de ferro finos, aditivos (por exemplo, cal, olivina) e materiais reciclados contendo ferro, provenientes de processos subsequentes de fabricação de ferro e aço (por exemplo, poeira da limpeza de gás de alto-forno) (IPCC, 2019; Mourão *et al.*, 2007).

O coque com partículas menores que 5 mm é o material comumente utilizado nas plantas de sinterização, assim como o gás de alto-forno ou o gás de coqueria produzido no local durante a produção integrada de ferro e aço. A operação das plantas de sinterização produz emissões de CO<sub>2</sub> a partir da oxidação da moinha de

coque e outros insumos. Os gases residuais da produção de sinter também contêm  $\text{CH}_4$  e outros hidrocarbonetos (IPCC, 2019; Mourão *et al.*, 2007).

O fluxo de massa apresentado na figura 19, as unidades são em toneladas por ano. As massas envolvidas nesse processo são as utilizadas como dado de entrada para o cálculo das emissões do setor indústria.

Figura 19 – Fluxo de massa da sinterização



Fonte: Cepemar, 2003.

Utilizando o fator de emissão 0,20 (quadro 1) e a equação 4, apresentados no item 4.1.1, referentes à sinterização, a emissão de GEE proveniente da produção de 7.178 toneladas de sinter será de 1.507.380 toneladas de  $\text{CO}_2$ .

### 5.1.3 Pelotização

As pelotas são formadas a partir de materiais brutos contendo ferro (minério fino e aditivos) em esferas de 9 a 16 mm em um processo com altíssima temperatura. O processo inclui moagem, secagem, pelotização e tratamento térmico dos materiais brutos (IPCC, 2019; Mourão *et al.*, 2007).

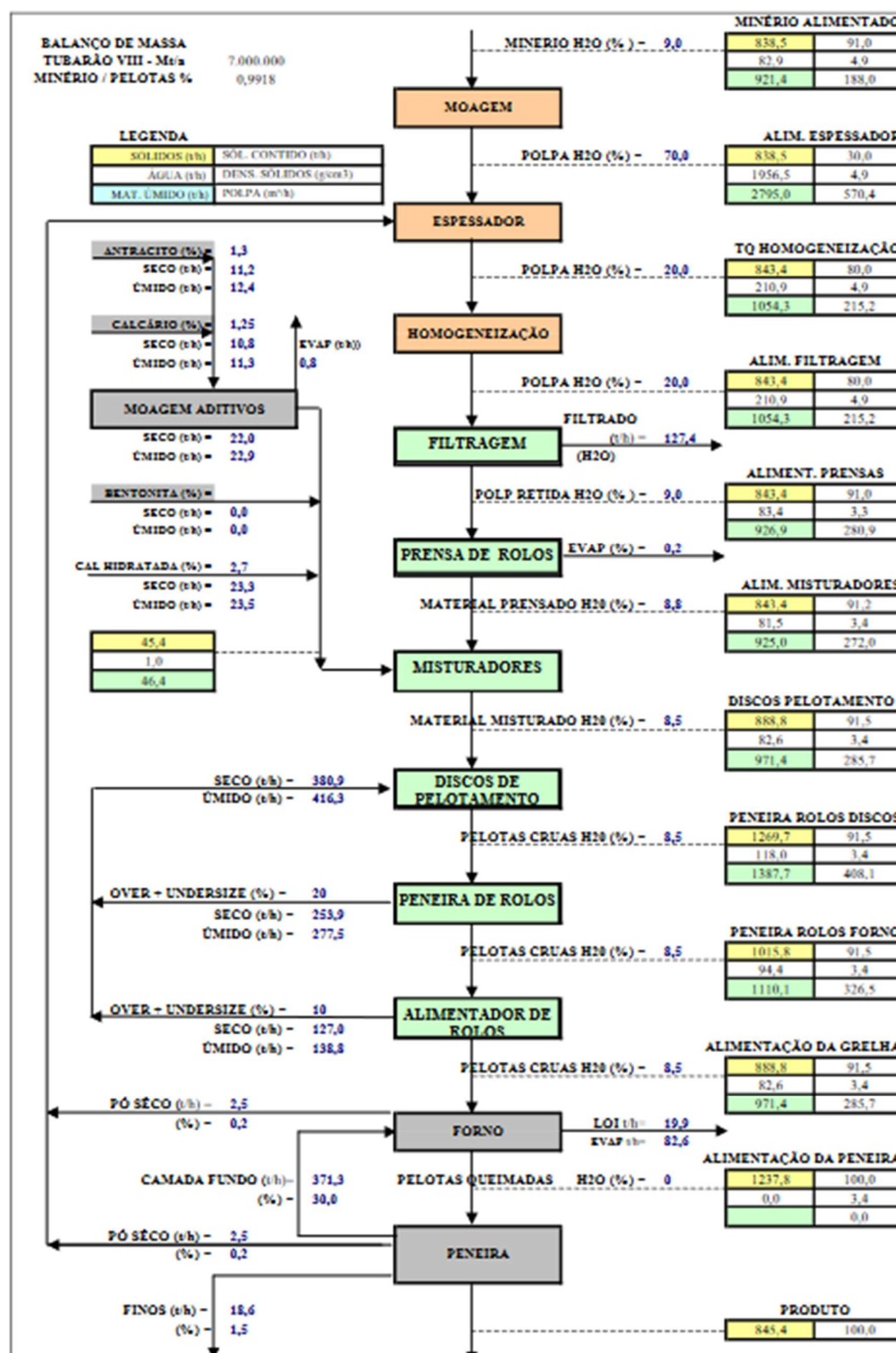
As plantas de pelotização estão localizadas principalmente em minas de ferro ou em portos de embarque, mas também podem estar situadas no local como parte de uma instalação integrada de ferro e aço (IPCC, 2019; Mourão *et al.*, 2007).

Gás natural ou carvão podem ser usados como combustível para as plantas de pelotização, e o gás de coqueria para plantas de pelotização localizadas no local em uma instalação integrada de ferro e aço. O consumo de energia do processo e as emissões associadas de  $\text{CO}_2$  dependerão, em parte, da qualidade do minério de

ferro e de outros materiais brutos utilizados no processo. As emissões de CO<sub>2</sub> também dependerão do teor de carbono e dos valores caloríficos dos combustíveis usados no processo (IPCC, 2019; Mourão *et al.*, 2007).

No fluxo de massa da pelletização, apresentado na figura 20, as massas envolvidas nesse processo não serão utilizadas como dado de entrada para o cálculo das emissões do setor Indústria, sendo apenas uma descrição simbólica do processo existente em uma das usinas de pelletização.

Figura 20 – Fluxo de massa da pelotização



Fonte: Cepemar, 2005.

Utilizando o fator de emissão 0,03 (quadro 1) e a equação 5, apresentados no item 4.1.1, referentes à pelotização, a emissão de GEE proveniente da produção de 14.677.000 toneladas de pelotas será de 2.788.630 toneladas de CO<sub>2</sub>.

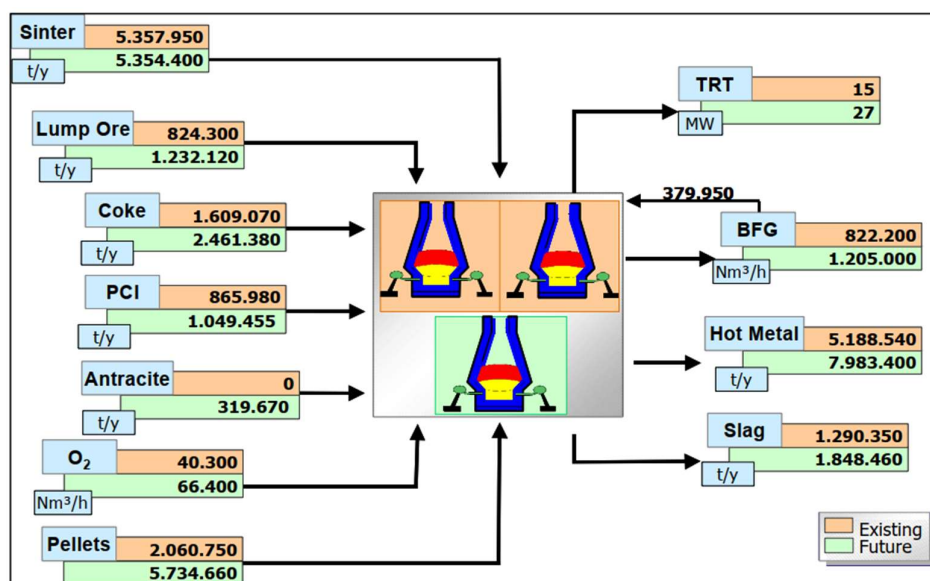
#### 5.1.4 Alto-forno e aciaria

A maior parte do CO<sub>2</sub> emitido pela indústria de ferro e aço está associada ao uso de carbono para converter minério de ferro em ferro. O carbono é fornecido ao alto-forno, principalmente na forma de coque, produzido a partir de carvão betuminoso de grau metalúrgico. Ele atua principalmente como agente redutor para converter óxidos de ferro em ferro no processo de fabricação de ferro, e como fonte de energia para fornecer calor quando o reage exotermicamente com o oxigênio (IPCC, 2019).

O gás de alto-forno é produzido durante a combustão do coque em altos-fornos. Ele é tipicamente recuperado e utilizado como combustível parcialmente dentro da planta e parcialmente em outros processos da indústria siderúrgica, ou em estações de energia equipadas para queimá-lo (IPCC, 2019).

No fluxo de massa do alto-forno, apresentado na figura 21, as massas envolvidas nesse processo são utilizadas como dado de entrada para o cálculo das emissões do setor Indústria.

Figura 21 – Fluxo de massa do alto-forno



Fonte: Cepemar, 2003.

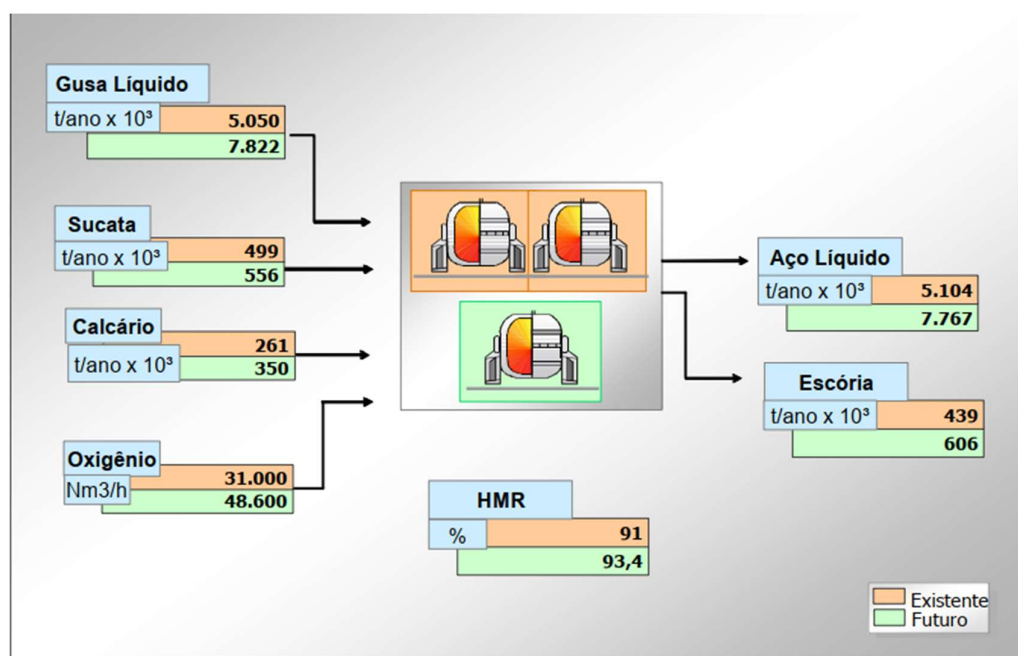
Utilizando o fator de emissão 1,35 (quadro 1) e a equação 3, apresentados no item 4.1.1, referentes à produção de ferro-gusa, a emissão de GEE proveniente da produção de 7.983.400 toneladas de ferro-gusa será de 11.415.690 toneladas de CO<sub>2</sub>.

A aciaria é a unidade fabril onde se faz a conversão de ferro-gusa líquido em aço nos fornos convertedores LD. O termo LD se refere à origem desse tipo de equipamento que ocorreu nas cidades suíças de Linz e Donawitz (Pinto Júnior *et al.*, 2018).

A produção de aço em BOF começa com a carga do recipiente com 70-90% de ferro fundido e 10-30% de sucata de aço. O oxigênio de alta pureza combina-se com o carbono no ferro para criar uma reação exotérmica que derrete a carga enquanto reduz o teor de carbono. O ferro proveniente do alto-forno geralmente contém 3-4% de carbono, que deve ser reduzido para menos de 1%, refinado e ligado para produzir o grau desejado de aço (Pinto Júnior *et al.*, 2018).

No fluxo de massa de aciaria, apresentado na figura 22, as massas envolvidas nesse processo também são utilizadas como dado de entrada para o cálculo das emissões do setor Indústria.

Figura 22 – Fluxo de massa da aciaria



Fonte: Cepemar, 2003.

Considerando o processo do BF-BOF juntos, para determinar a emissão de CO<sub>2</sub>, exclusivamente para esse processo, realizou-se a diferença entre a emissão de GEE para a produção de ferro-gusa e da produção de aço. Com isso, utilizou-se o fator de emissão 1,46 referente ao método de produção de aço e a equação 2, apresentados no item 4.1.1, subtraídos do resultado apresentado para as emissões provenientes da produção de ferro-gusa. Com isso, obteve-se como resultado a emissão de 758.210 toneladas de CO<sub>2</sub> provenientes da produção de 7.705.000 toneladas de aço.

#### 5.1.5 Compilado das emissões na siderurgia

Os resultados das emissões de cada etapa são apresentados na tabela abaixo. A representatividade de cada processo pode ser observada na figura 23.

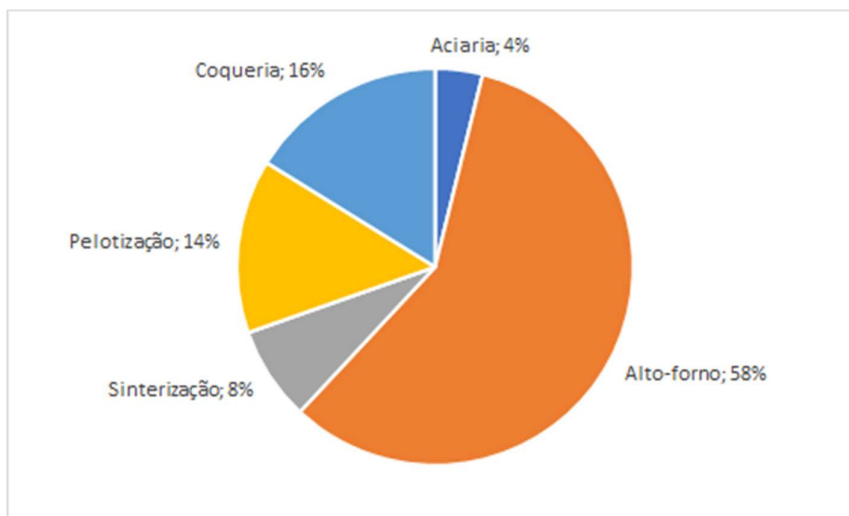
Tabela 2 – Emissões de CO<sub>2</sub> por etapa da siderurgia

<b>Processo</b>	<b>Emissão (toneladas CO<sub>2</sub>)</b>
Pelotização	2.788.630,00
Sinterização	1.507.380,00
Coqueria*	3.179.550,00
Alto-forno	11.415.690,00
Aciaria	758.210,00
<b>Total setor energia</b>	<b>3.179.550</b>
<b>Total setor siderurgia</b>	<b>16.469.910</b>

\*Emissão atribuída ao setor Energia, conforme IPPC, 2019.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Representatividade das emissões da siderurgia



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.2 FONTES RENOVÁVEIS DE COMBUSTÍVEL EM USINAS SIDERÚRGICAS: ESTIMATIVAS DOS NOVOS CONSUMOS

Buscando reduzir as emissões de GEE nos processos da siderurgia citados no tópico anterior sem haver troca de maquinários ou da rota produtiva, foram utilizadas fontes que forneciam fatores de emissão para outros tipos de combustíveis para cada um dos processos citados neste trabalho.

De acordo com Mousa, Wang, Riesbeck e Larsson (2016), uma das formas de se reduzir emissões na coqueria é o uso de biomassa, principalmente o uso de carvão vegetal, na geração de energia e calor. Em seu estudo, foi identificado que substituir parcialmente o uso de carvão mineral por carvão vegetal pode resultar em uma redução na emissão de CO<sub>2</sub> de 1 a 5%, ao utilizar cerca de 32,8 kg desse material por tonelada de ferro-gusa. Com isso, é possível obter um fator de emissão de 1,19 tonelada de CO<sub>2</sub> por tonelada de ferro-gusa, quando observado o processo inteiro.

No processo de sinterização, é possível reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> cerca de 5 a 15%, utilizando-se cerca de 70,5 kg de carvão vegetal por tonelada de ferro-gusa produzido, substituindo parcialmente o carvão mineral utilizado para gerar calor e energia no forno da sinterização. Assim, o processo emite cerca de 0,19 tonelada de CO<sub>2</sub> por tonelada de ferro-gusa (Mousa *et al.*, 2016).

Em outro estudo, elaborado por Yufeng *et al.* (2023), mostrou que por meio do uso de gás natural nos fornos da sinterização, é possível obter um fator de emissão para o processo de 0,18 tonelada de CO<sub>2</sub> por tonelada de sinter produzido.

Quanto à pelletização, segundo o projeto elaborado pela VALE em 2023, a utilização de biocarbono, uma mistura de carvão vegetal e carvão mineral, no lugar do carvão antracito durante o processo de queima das pelotas é possível reduzir cerca de 40% das emissões de CO<sub>2</sub> no processo (Vale, 2023b). Com isso, a emissão de CO<sub>2</sub> durante o processo passa a ser de 0,10 tonelada por tonelada de pelota produzida.

Na etapa mais geradora de GEE, a obtenção de ferro-gusa no alto-forno e aço na aciaria, as medidas de descarbonização normalmente associadas à rota do BF-BOF estão relacionadas à substituição dos combustíveis para geração de energia e calor, e a substituição do agente redutor, por substâncias menos poluentes (Fan & Friedmann, 2021).

Três combustíveis que têm se destacado são o hidrogênio, o gás natural, e a biomassa, servindo como combustível e/ou agente redutor. Mesmo que o gás natural não seja um biocombustível, ele tem sido utilizado como um combustível de transição, enquanto as novas tecnologias são desenvolvidas para o uso de hidrogênio e outras fontes renováveis ainda estudadas (Fan & Friedmann, 2021).

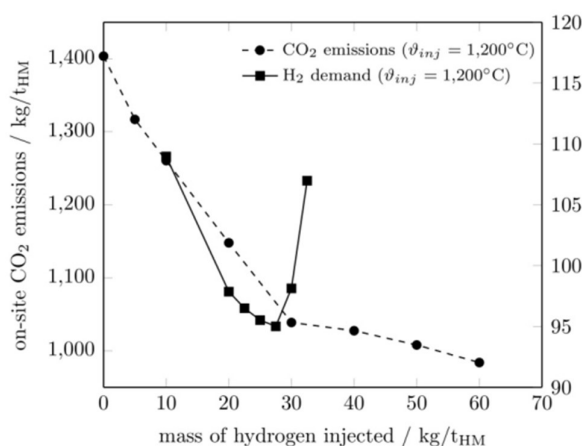
Em 2017, um estudo observou que para substituir cerca de 120 kg de coque pulverizado, utilizado no processo de redução por hidrogênio, na rota BF-BOF, são necessários 27,5 kg de hidrogênio por tonelada de ferro-gusa produzido, conforme observado na figura 24. Entretanto, a adição do hidrogênio provoca alterações na temperatura ótima de operação, e nas taxas de utilização de gases e de reação, de modo a ser necessário reajustar os demais combustíveis fósseis utilizados nesse processo (Yilmaz, Wendelstorf e Turek, 2017).

A temperatura com a qual o hidrogênio é injetado no alto-forno também influencia no processo, já que à medida em que aumenta a taxa de injeção dessa substância, a reação dentro do forno tende a diminuir o potencial exotérmico do processo, havendo necessidade de alterar outras variáveis, como o volume de oxigênio

injetado, e a massa de coque queimado para geração de calor (Yilmaz, Wendelstorf e Turek, 2017).

Com isso, foi observado que a injeção de hidrogênio à 1200°C permite um melhor aproveitamento do gás no processo de redução do óxido de ferro. O uso de hidrogênio no alto-forno resulta em uma redução de aproximadamente 21% nas emissões de CO<sub>2</sub>, apresentado um fator de emissão de 1,063 tonelada de CO<sub>2</sub> por tonelada de ferro-gusa produzido (Yilmaz, Wendelstorf e Turek, 2017).

Figura 24 – Relação entre massa de hidrogênio injetada no alto-forno e a emissão de CO<sub>2</sub>



Fonte: Yilmaz, Wendelstorf e Turek (2017).

Quanto ao uso de gás natural, em um estudo desenvolvido por Wang, Ryman e Dahl (2009), foi utilizado uma injeção de 8,86 m<sup>3</sup> de gás por tonelada de aço fabricado, que resultou em um fator de emissão de 1,20 tonelada de CO<sub>2</sub> por tonelada de aço produzido.

O uso de biomassa, principalmente carvão vegetal, vem sendo estudado como fonte alternativa para geração de energia e calor no alto-forno, como uma alternativa aos combustíveis fósseis. Um artigo obteve o fator de emissão 1,43 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de aço produzido para uma taxa de uso desse combustível de 120 kg por tonelada de aço (Helle *et al.*, 2010).

O consumo total de cada tipo de combustível considerado em cada etapa foi compilado na tabela 3, apresentada abaixo.

Tabela 3 – Consumo total de cada combustível, considerando mitigação em cada processo

Consumo de combustível			
Processo	Hidrogênio (kt/ano)	Gás Natural (Mm <sup>3</sup> )	Biomassa (Mt)
Coqueria	N.A*	N.A*	0,26
Pelotização	N.A*	N.A*	2,45
Sinterização	N.A*	568,62	0,56
Alto-forno e aciaria	219,53	68,27	0,92

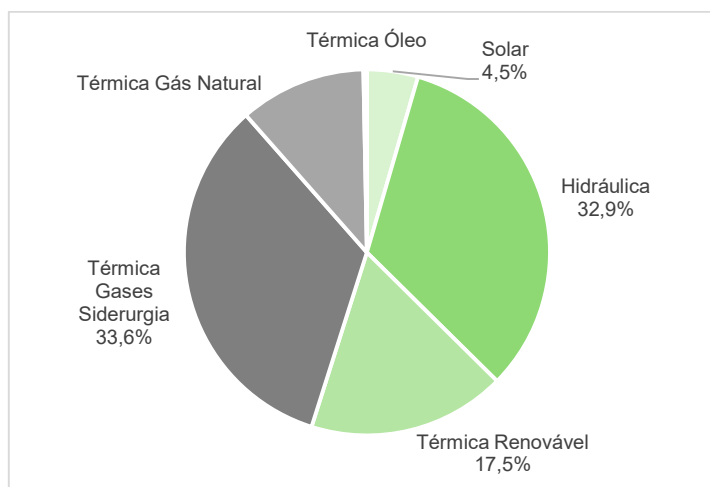
\*N.A = valores não aplicáveis.

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3 DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO ATUAL E CAPACIDADE FUTURA DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL

De acordo com o Balanço Energético do Estado do Espírito Santo, em 2022, cerca de 14,9% da produção de energia primária no Estado é proveniente de fontes renováveis, enquanto os restantes 85,1%, de fontes não renováveis. Quanto à geração de energia elétrica, foi gerado um total de 7.535,772 GWh. Desse total, 54,9% foram produzidos por fontes renováveis e 45,1% por fontes não renováveis. A energia solar fotovoltaica representou apenas 4,5% do total. Não houve geração de energia eólica indicada no documento, sendo uma tecnologia ainda a ser implementada no Estado (ARSP, 2023).

Figura 25 – Representatividade da geração de energia por fonte geradora



Fonte: Elaborado pelo autor (adaptado da ARSP, 2023).

A capacidade futura de geração de energia renovável e combustível verde deve levar em consideração as Diretrizes 1 e 2, respectivamente, propostas pelo Plano de Descarbonização e Neutralização das Emissões de GEE do Espírito Santo (Reis Júnior *et al.*, 2022), e suas relativas estratégias para implementação (EI), conforme observado nos quadros 2 e 3.

No Plano, a estratégia para implementação EI1.1 Fomentar energia eólica, foi indicada como principal aliada na geração de Hidrogênio por conta sua maior capacidade de geração de energia. Porém, as demais podem ser utilizadas como alternativas, caso seja necessário.

Quadro 2 – Diretriz 1 do Plano de Descarbonização e Neutralização das Emissões de GEE

<b>Diretriz 1 – Geração de eletricidade com fontes limpas e maximização de potencial</b>				
<b>Estratégia</b>	<b>Indicador (variável para estimativa de emissões)</b>	<b>Cenário de mitigação metas física</b>		
		<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
EI1.1 Fomentar energia eólica	Capacidade instalada de geração eólica (GW) até o ano considerado.	0	3,96	5,95
EI1.2 Fomentar energia solar	Capacidade instalada de geração fotovoltaica centralizada (GW) até o ano considerado.	0,5	0,83	1,66
EI1.3 Aproveitamento do potencial de hidroeletricidade	Aumento da capacidade instalada (GW) – acumulada em relação ao cenário base	0,0084	0,0122	0,0122
	Capacidade instalada de geração hidroelétrica (GW) até o ano considerado.	0,018	0,051	0,055
EI1.4 Estimular a aquisição de energia elétrica de fontes renováveis no mercado livre de energia	% da energia importada pelo ES representado por energia renovável comprada no mercado livre.	19,5%	27,8%	36%

Fonte: Elaborado pelo autor (adaptado de Reis Júnior *et al.*, 2022).

Quadro 3 – Diretriz 2 do Plano de Descarbonização e Neutralização das Emissões de GEE

Diretriz 2 – Emprego biocombustíveis e novos combustíveis				
Estratégia	Indicador (variável para estimativa de emissões)	Cenário de mitigação metas física		
		2030	2040	2050
EI2.1 Fomentar produção de hidrogênio	Produção de hidrogênio (kt/ano)	2,0	240,9	353,7
EI2.2 Fomentar o emprego de biomassa/ biocombustíveis na indústria	Quantidade de biomassa consumida como fonte térmica na indústria	0,19 Mt	0,19 Mt	1,2 Mt
EI2.3 Gás natural como combustível de transição para combustíveis renováveis	Quantidade de gás natural utilizada na indústria	1,3 Mm <sup>3</sup> dia	1,3 Mm <sup>3</sup> dia	1,3 Mm <sup>3</sup> dia

Fonte: Elaborado pelo autor (adaptado de Reis Júnior *et al.*, 2022).

#### 5.4 ESTIMATIVA DA EMISSÃO DE GEE A PARTIR DA SUBSTITUIÇÃO DAS FONTES

As emissões de GEE estimadas a partir do consumo de combustíveis apresentadas na tabela 4, associadas aos fatores de emissão indicados pelos estudos das possíveis substituições de combustíveis discutidos no tópico 5.2, são apresentadas abaixo por processo de produção.

Tabela 4 – Redução das emissões de GEE a partir da substituição das fontes

Emissão mitigação (CO <sub>2</sub> em toneladas)							
Processo	Emissão atual	Hidrogênio		Gás Natural		Biomassa	
		n	%	n	%	n	%
Coqueria	3.179.550,00	N.A*	-	N.A*	-	3.084.163,50	3
Pelotização	2.788.630,00	N.A*	-	N.A*	-	1.467.700,00	47
Sinterização	1.507.380,00	N.A*	-	1.271.080,24	16	1.356.642,00	10
Alto-forno e aciaria	12.173.900,00	9.244.139,00	24	9.246.000,00	24	11.018.150,00	9

\*N.A = valores não aplicáveis.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, os combustíveis que apresentam maior potencial de redução de emissão de GEE para cada etapa são:

- Coqueria: biomassa;
- Pelotização: biomassa;
- Sinterização: gás natural;
- Alto-forno e aciaria: hidrogênio.

O uso desses combustíveis resultou em uma redução na emissão de 23%, sendo inicialmente 19.649.460 toneladas de CO<sub>2</sub> para 15.067.083 toneladas de CO<sub>2</sub>. Esse resultado é próximo do apresentado por Fan e Friedmann (2021) que, em seu estudo, indicaram potencial de 20% de redução nas emissões de CO<sub>2</sub> após substituições dos combustíveis sem alteração de etapas do processo.

Mesmo que percentualmente os resultados da redução das emissões para o alto-forno e aciaria seja o mesmo na substituição por uso de hidrogênio e gás natural, prefere-se o uso de hidrogênio, pois a queima desse gás não emite CO<sub>2</sub> e será preferencialmente obtido por meio de fontes renováveis, conforme apresentado no Plano de Descarbonização.

## 5.5 CUSTOS PARA APLICAÇÃO DAS NOVAS TECNOLOGIAS

Os dados da demanda de consumo de combustíveis para os processos que apresentaram menores emissões (tabela 3), com as metas de geração desses combustíveis apresentadas na Diretriz 2 do Plano de Descarbonização do Espírito Santo até 2050 (quadro 3) são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Comparação de combustível necessário e combustível disponível.

<b>Metas do Plano de Descarbonização</b>				
<b>Combustível</b>	<b>Consumo/ Mitigação</b>	<b>Uso em Cenários de mitigação</b>		
		<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Hidrogênio (kt H <sub>2</sub> /ano)	219,53	2	240,9	353,7
Gás Natural (Mm <sup>3</sup> /ano)	568,52	474,5	474,5	474,5
Biomassa (Mt/ano)	2,71	0,19	0,19	1,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que a partir do ano de 2040, a demanda de hidrogênio deve ser atendida, quando a produção de hidrogênio possivelmente será maior que a demanda estimada.

Quanto ao gás natural, a demanda pode superar o uso estimado desse combustível pelo Plano de Descarbonização. Porém, como a EI2.3 (quadro 3) é uma estimativa do uso e não necessariamente da produção de gás natural, essa demanda poderá ser atendida pela produção do gás no estado, haja visto que, de acordo com o Boletim do Gás Natural do Espírito Santo, a média da produção diária do mês de dezembro de 2023 foi de 140,1 Mm<sup>3</sup>/dia (ARSP, 2024).

Por fim, a demanda de biomassa deve ser maior que a estimada pelo Plano para consumo pelas indústrias, até mesmo em 2050. Essa opção de combustível deve ser analisada também pelo setor de AFOLU, já que há a necessidade de disponibilidade de terra para a produção de madeira voltada para o uso pelas indústrias.

Em relação aos custos financeiros, utilizando-se os dados dos preços para cada tipo de combustível apresentados no item 4.2 e os dados de consumo da Tabela 3, foram obtidos os seguintes valores para a rota menos poluente, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Estimativa do custo total do uso dos combustíveis

Combustível	Custo médio	Custo total (R\$)*
Hidrogênio (US\$/kg)	US\$3,215	3.543.060.529,00
Gás Natural (R\$/m <sup>3</sup> )	R\$2,84	1.616.596.800,00
Biomassa (US\$/kg)	US\$0,22	596.838.308,00
<b>Custo total de todas as substituições:</b>		<b>R\$5.754.495.637,00</b>

\*Considerando o valor médio de conversão do dólar R\$5,02, em 2023, segundo Receita Federal.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o custo total do uso das fontes de combustíveis alternativos, pode-se perceber que há uma necessidade muito grande na redução dos custos da utilização dessas fontes para que se torne algo viável. Cabe destacar que o valor associado ao hidrogênio leva em consideração a utilização de fontes renováveis, o que aumenta o custo do processo de obtenção.

Quanto à demanda de eletricidade necessária para a produção de hidrogênio, utilizando a Tabela 1 pôde-se estimar a potência instalada necessária para produzir os 219,53 kt de hidrogênio por ano, sendo os resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Estimativa da potência instalada necessária para produção de hidrogênio de acordo com a tecnologia utilizada

<b>Tecnologia</b>	<b>Consumo de energia (kWh/kgH<sub>2</sub>)</b>	<b>Potência instalada necessária (GW)</b>
Eletrólise PEM	47-63	1,38
Eletrólise alcalina	47-66	1,42
Eletrólise direta da água do mar	50-53	1,29

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a estratégia EI1.1 Fomentar energia eólica, da Diretriz 1, apresentada no quadro 2, apenas a geração de energia pelas fontes eólicas seria suficiente para atender a demanda energética para produzir a quantidade de hidrogênio necessário na siderurgia. Com um potencial de geração de 3,96 GW de energia em 2040, haveria certa folga no uso da eletricidade gerada pelas turbinas eólicas, podendo ser utilizado o superávit energético em outros setores, reduzindo a emissão de outras atividades.

## 6 CONCLUSÃO

Ao final deste trabalho, conclui-se que a maior parte das emissões de gases do efeito estufa são provenientes do subsetor Siderurgia, podendo emitir cerca de 19.649.460 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano no Espírito Santo. A obtenção de ferro-gusa no alto-forno, é a etapa do processo de fabricação de ferro e aço responsável por emitir aproximadamente 58% de GEE.

Os principais combustíveis fósseis responsáveis por essas emissões são o carvão metalúrgico e o coque. Ambos são amplamente utilizados nas diferentes etapas, principalmente quando há a necessidade de geração de calor no processo. Já os combustíveis alternativos, normalmente utilizados, são o hidrogênio, o gás natural e a biomassa.

O hidrogênio é fonte que apresenta maior custo, contudo ele pode auxiliar na redução de 24% da emissão de GEE no processo da obtenção de ferro-gusa e aço no alto-forno e aciaria. O gás natural, considerado principalmente como um combustível alternativo e de transição para o hidrogênio, pode auxiliar na redução de 16% das emissões na sinterização e 24% no alto-forno. Porém, por ainda ser um combustível fóssil, não é desejável que seja utilizado no longo prazo sem o uso de outras medidas mitigadoras. A biomassa, principalmente carvão vegetal, pode auxiliar na redução das emissões em 3% na coqueria, 47% na pelletização, por meio da formação de pelotas de biocarbono, 10% na sinterização e 9% na obtenção do ferro e aço.

Em suma, quando associados, os principais combustíveis alternativos em suas respectivas etapas mais mitigadas, têm o potencial de redução de até 23% das emissões totais da siderurgia.

É importante evidenciar que o Espírito Santo, conforme as diretrizes e metas do plano de descarbonização e neutralização das emissões de GEE, conseguiria atender a demanda de hidrogênio e gás natural, incluindo a energia necessária para a obtenção do hidrogênio. Porém, quanto ao uso de biomassa, a demanda deve ser um pouco maior que a indicada como plano para o futuro.

Ademais, é importante que sejam adotadas as medidas para a substituição dos atuais combustíveis fósseis utilizados na siderurgia pelas opções alternativas

apresentadas, de modo a reduzir as emissões dos gases de efeito estufa na atividade siderúrgica do Estado do Espírito Santo. Ainda que as alternativas apresentem obstáculos, principalmente financeiros, há a necessidade de incentivos fiscais e políticos para alcançar os objetivos de mitigação.

## REFERÊNCIAS

Arcellor Mittal. **Unidade de produção integrada de aços planos, localizada na Região Metropolitana da Grande Vitória (ES), no Sudeste do Brasil**. Vitória: Arcellor Mittal, 2024. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/a-arcelormittal/quem-somos/arcelormittal-tubarao>

ARSP. Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo. **Balanço energético do estado do Espírito Santo 2022 – ano base 2021**. ARSP, 2023. Disponível em: <https://arsp.es.gov.br/Media/arsi/Energia/Boletins/Balan%C3%A7o%20Energ%C3%A9tico/BEES2022-Base2021.pdf>. Acesso em: julho de 2023.

ARSP. Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo. **Resolução ARSP Nº075, de 17 de julho de 2024**. ARSP, 2024. Disponível em: <https://arsp.es.gov.br/Media/arsi/Legisla%C3%A7%C3%A3o/Resolu%C3%A7%C3%B5es%20G%C3%A1s%20Natural/ARSP/2024/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20ARSP%20n%C2%B0%20075,%20de%2017%20de%20julhocde%202024.pdf>. Acesso em: maio de 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Anuário estatístico do setor metalúrgico 2020 – ano base 2019**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-2020-ano-base-2019.pdf/view>. Acesso em: julho de 2023.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. **Quarta comunicação nacional do Brasil à convenção quadro das nações unidas sobre mudança do clima**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021. Disponível em: <https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/4782>. Acesso em: julho de 2023.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 6. ed. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf/@download/file/6a%20ed%20Estimativas%20Anuais.pdf>. Acesso em: julho de 2023.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Relatórios de referência setorial**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: julho 2023.

CELA. Clean Energy Latin America. **Custo nivelado de hidrogênio verde no Brasil**. CELA, 2023. Disponível em: <https://cela.com.br/wp-content/uploads/2023/08/LCOH-pt-1.pdf>. Acesso em: julho de 2024.

CEPEMAR. **Relatório de impacto ambiental - projeto de expansão do complexo siderúrgico de Tubarão.** Relatório técnico, 2003. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/sala-imprensa/publicacoes-relatorios/tubarao/rima-relatorio-de-impacto-ambiental-do-projeto-de-expansao-do-complexo-siderurgico-de-tubarao-75mt-ano>. Acesso em: julho de 2024.

CEPEMAR. **Estudo de Impacto Ambiental - expansão do complexo de pelletização de Tubarão (CVRD).** Estudo de Impacto Ambiental, 2005. Disponível em: <https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/EIA/2005/Expans%C3%A3o%20da%20produ%C3%A7%C3%A3o%20do%20complexo%20Tubar%C3%A3o/2-%20Caracteriza%C3%A7%C3%A3o%20do%20Empreendimento.pdf>. Acesso em: julho de 2024.

EL-SHAFIE, Mostafa. **Hydrogen production by water electrolysis technologies: a review.** Results in Engineering, v. 20, 2023, e101426. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426>. Acesso em: julho de 2024.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2020 – ano base 2019.** Brasília: EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: julho 2023.

FAN, Zhiyuan; FRIEDMANN, Julio. **Low-carbon production of iron and steel: technology options, economic assessment, and policy.** Joule, v. 5, n. 4, 2021, p. 829-862. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>. Acesso em: julho de 2024.

HELLE, Hannu; HELLE, Mikko; PETTERSSON, Frank; SAXÉN, Henrik. **Optimisation study of ironmaking using biomass.** Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications, v. 37, n. 8, 2010, p. 590–98. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/030192309X12506804200582>. Acesso em: julho de 2024.

HOUGHTON, John. **Global warming: the complete briefing.** 4. ed. Cambridge: Cambridge University Press: 2015.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2022 mitigation of climate change:** Working group III contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 2022. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_FullReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf). Acesso em: julho de 2024.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.** 2019. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>. Acesso em: julho de 2024.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Energy**. Guidelines for national greenhouse gas inventories, v. 2, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>. Acesso em: julho de 2023.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Industrial Processes and Product Use**. Guidelines for national greenhouse gas inventories, v. 3, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol3.html>. Acesso em: julho de 2023.

MOURÃO, Marcelo Breda *et al.* **Introdução à Siderurgia**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 2007. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5635026/mod\\_resource/content/0/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20a%20Siderurgia%20-%20Mour%C3%A3o%2C%20MB.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5635026/mod_resource/content/0/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20a%20Siderurgia%20-%20Mour%C3%A3o%2C%20MB.pdf). Acesso em: julho de 2024.

MOUSA, Elsayed; WANG, Chuan; RIESBECK, Johan; LARSSON, Mikael. **Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 65, 2016, p.1247-1266. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.061>. Acesso em: julho de 2024.

MYHRE, Gunnar *et al.* **Anthropogenic and Natural Radiative Forcing**. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment. Cambridge University Press, 2013. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_Chapter08\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf). Acesso em: julho de 2024.

PINTO JUNIOR, Dário Moreira; SHITSUKA, Dorlivete Moreira; SHITSUKA, Ricardo; COSTA, Wellington Leôncio. **Tecnologia Siderúrgica**. 1. ed. Poisson: Belo Horizonte, 2018. Disponível em: [https://poisson.com.br/livros/individuais/Tecnologia\\_siderurgica/Tecnologia\\_Sider%C3%BArgica.pdf](https://poisson.com.br/livros/individuais/Tecnologia_siderurgica/Tecnologia_Sider%C3%BArgica.pdf). Acesso em: julho de 2024.

REIS JÚNIOR, Neyval Costa *et al.* **Plano de descarbonização e neutralização das emissões de GEE do Espírito Santo**: relatório técnico. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2022. Disponível em: <https://seama.es.gov.br/Media/Seama/Documentos/Plano%20de%20Descarboniza%C3%A7%C3%A3o%20e%20Neutraliza%C3%A7%C3%A3o%20das%20Emiss%C3%B5es%20de%20GEE%20do%20Esp%C3%ADrito%20Santo%20VERS%C3%83O%20-%20I.pdf>. Acesso em: julho de 2023.

SANTOS, Jeronimo Alves dos; FERREIRA FILHO, Joaquim Bento de Souza. **Substituição de combustíveis fósseis por etanol e biodiesel no Brasil e seus impactos econômicos**: uma avaliação do plano nacional de energia 2030. Pesquisa e planejamento econômico (PPE), v. 47, n. 3, 2017. Disponível em: <https://ppe.ipea.gov.br/index.php/ppe/article/viewFile/1624/1257>. Acesso em: julho de 2023.

VALE. **Produção e vendas da Vale no 4T22 e 2022**. Rio de Janeiro: Vale, 2023a. Disponível em: <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/53207d1c-63b4-48f1-96b7->

19869fae19fe/3ac5efd6-1daf-1965-9290-6d810a4dff4b?origin=1. Acesso em: junho de 2024.

VALE. **Vale makes pellets using renewable energy sources for the first time.** Austrália: Vale, 2023b. Disponível em: <https://vale.com/w/vale-makes-pellets-using-renewable-energy-sources-for-the-first-time>. Acesso em: julho de 2024.

YILMAZ, Can; WENDELSTORF, Jens; TUREK, Thomas. **Modeling and simulation of hydrogen injection into a blast furnace to reduce carbon dioxide emissions.** Journal of Cleaner Production, v. 154, 2017, p. 488-501. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.162>. Acesso em: julho de 2024.

YUFENG, Wu; FAN, Xiaohui; JI, Zhiyun; GAN, Min; YU, Dan; SUN, Zengqing; CHEN, Xuling; LIU, Lincheng; HUANG, Xiaoxian; LI, Jinhua. **Comprehensive evaluation of hydrogen-rich energy application in iron ore sintering process: Deep function mechanism analysis and process optimization.** Journal of Cleaner Production, v. 420, 2023, 138451. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138451>. Acesso em: julho de 2024.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. **Information on Global Warming Potentials.** Technical Paper. 2004. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/tp/tp0403.pdf>. Acesso em: julho de 2023.

WANG, Chuan; RYMAN, Christer; DAHL, Jan. **Potential CO<sub>2</sub> emission reduction for BF–BOF steelmaking based on optimised use of ferrous burden materials.** International Journal of Greenhouse Gas Control, v. 3, n. 1, 2009, p. 29-38. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.06.005>. Acesso em: julho de 2024.