



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**AUTOMATIZAÇÃO DE DADOS PARA CÁLCULO DE INVENTÁRIO DE GASES
DE EFEITO ESTUFA – ESTUDO DE CASO EM UMA UNIDADE OPERACIONAL
DE UMA MULTINACIONAL DA INDÚSTRIA DO AÇO**

Sarah Oliveira Lopes

Belo Horizonte

2025

Sarah Oliveira Lopes

**AUTOMATIZAÇÃO DE DADOS PARA CÁLCULO DE INVENTÁRIO DE GASES
DE EFEITO ESTUFA – ESTUDO DE CASO EM UMA UNIDADE OPERACIONAL
DE UMA MULTINACIONAL DA INDÚSTRIA DO AÇO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista

Orientador: Prof. Dr. Daniel Brianezi

Belo Horizonte

2025

SARAH OLIVEIRA LOPES

AUTOMATIZAÇÃO DE DADOS PARA CÁLCULO DE INVENTÁRIO DE GASES DE EFEITO ESTUFA – ESTUDO DE CASO EM UMA UNIDADE OPERACIONAL DE UMA MULTINACIONAL DA INDÚSTRIA DO AÇO

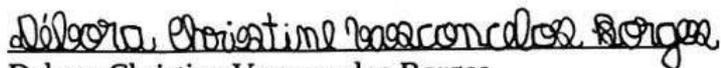
Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 10 de Julho de 2025

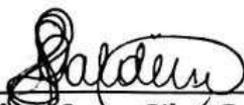
Banca examinadora:



Daniel Brianezi – Presidente da Banca Examinadora
Prof. DSc. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Orientador



Debora Christine Vasconcelos Borges
Analista de Sustentabilidade - ArcelorMittal Brasil



Stefane Souza Silva Caldeira
Analista de Descarbonização – ArcelorMittal Aços Longos e Mineração LATAM

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por Sua presença constante e por ter me sustentado com fé, em cada etapa desta jornada rumo a graduação. A minha família, meu alicerce. Aos meus pais, Rosana e Aurélio, por acreditarem em mim e por estarem sempre ao meu lado. Ao meu namorado, Arthur Medrado, por caminhar comigo com paciência, escuta e incentivo diário. Ao meu professor orientador, Daniel Brianezi pela orientação e pela confiança depositada neste trabalho desde o início. Aos professores do CEFET-MG, especialmente do Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, por cada ensinamento transmitido com dedicação, que me formaram não apenas como profissional, mas como pessoa. A minha amiga, Alice Resende, por tantos momentos, conversas e risadas durante esses cinco anos e meio de graduação. A Gerência de Descarbonização e Circularidade da ArcelorMittal, em especial a Stefane Caldeira, por acreditar em mim e por confiar no meu trabalho. E a equipe de TI, representada por Daiana, Otho, Oscar, Gabriel e Evelin, por todo o suporte e colaboração fundamental para este projeto.

A todos vocês, que me acompanharam e contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade, minha eterna gratidão.

RESUMO

LOPES, SARAH OLIVEIRA. **Automatização de dados para cálculo de inventário de gases de efeito estufa – estudo de caso em uma unidade operacional de uma multinacional da indústria do aço.** 2025. 88 p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

A indústria do aço é uma das maiores emissoras de gases de efeito estufa (GEE) do setor industrial global, respondendo por uma parcela significativa das emissões devido ao uso intensivo de energia e a transformação do minério de ferro em aço. Com o avanço das exigências regulatórias e institucionais por maior rastreabilidade e precisão nos inventários de emissões de GEE, torna-se essencial adotar soluções tecnológicas que assegurem a confiabilidade dos dados reportados. Neste contexto, o presente trabalho apresenta um estudo de caso sobre a implantação de uma ferramenta automatizada para a elaboração do inventário de GEE em uma unidade operacional de uma multinacional da indústria do aço. A iniciativa surgiu da necessidade de aprimorar a gestão das emissões, reduzindo o esforço operacional envolvido na coleta, consolidação e reporte de dados, ao mesmo tempo em que se buscava maior rastreabilidade e frequência na atualização das informações. A metodologia adotada envolveu a padronização de códigos de insumos, produtos e processos; o mapeamento das origens de dados nos sistemas corporativos; a organização das informações em um *datalake*; e o desenvolvimento de painéis de validação e análise em *Power BI*. A automatização resultou em ganhos expressivos de produtividade, padronização e controle, fortalecendo a gestão de dados de carbono da organização. Além disso, viabilizou um modelo de reporte mais frequente e confiável, alinhado aos compromissos institucionais com sustentabilidade e em conformidade metodológica com a *World Steel Association*, ao mesmo tempo em que responde as crescentes exigências nacionais e internacionais por maior transparência, rastreabilidade e robustez nos inventários de emissões.

Palavras-Chaves: Gestão de Carbono. Siderurgia. Sustentabilidade. Dados Ambientais.

ABSTRACT

LOPES, SARAH OLIVEIRA. **Data automation for greenhouse gas inventory calculation – case study in an operational site of a multinational steel company.** 2025. 88 p. Undergraduate thesis (Environmental and Sanitary Engineering) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

The steel industry is one of the largest emitters of greenhouse gases (GHG) in the global industrial sector, accounting for a significant share of emissions due to its intensive energy use and the transformation of iron ore into steel. With the growing regulatory and institutional demands for greater traceability and accuracy in GHG emissions inventories, it becomes essential to adopt technological solutions that ensure the reliability of reported data. In this context, this study presents a case study on the implementation of an automated tool for the preparation of the GHG inventory in an operational unit of a multinational steel company. The initiative arose from the need to improve emissions management by reducing the operational effort involved in data collection, consolidation, and reporting, while increasing the traceability and frequency of information updates. The methodology involved the standardization of codes for inputs, products, and processes; mapping data sources within corporate systems; organizing the information in a datalake; and developing validation and analysis dashboards in Power BI. The automation led to significant gains in productivity, standardization, and control, strengthening the organization's carbon data management. Moreover, it enabled a more frequent and reliable reporting model, aligned with institutional sustainability commitments and methodologically compliant with the World Steel Association, while addressing growing national and international demands for greater transparency, traceability, and robustness in emissions inventories.

Keywords: Carbon Management. Steel Industry. Sustainability. Environmental Data.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	A indústria do aço	16
3.2	Processo produtivo siderúrgico	17
3.2.1	<i>Preparação das matérias-primas</i>	18
3.2.1.1	<i>Aglomerção do minério de ferro</i>	18
3.2.1.2	<i>Coqueificação</i>	20
3.2.1.3	<i>Carbonização da madeira</i>	20
3.2.2	<i>Redução</i>	21
3.2.3	<i>Refino primário</i>	22
3.2.4	<i>Refino secundário</i>	23
3.2.5	<i>Lingotamento contínuo</i>	23
3.2.6	<i>Laminação</i>	24
3.2.7	<i>Trefilação</i>	24
3.3	Mudanças Climáticas	24
3.3.1	<i>Gases de Efeito Estufa</i>	25
3.3.2	<i>Acordos globais para o clima</i>	27
3.3.3	<i>Pacto ecológico Europeu</i>	28
3.3.4	<i>Legislação e política climática no Brasil</i>	29
3.4	Inventário de Gases de Efeito Estufa	31
4	METODOLOGIA	34
4.1	Delimitação do estudo	34
4.2	Metodologia <i>World Steel Association</i> para inventários GEE	36

4.3 Viabilização da automatização dos dados	38
4.3.1 <i>Codificação e padronização dos dados</i>	39
4.3.2 <i>Levantamento e mapeamento das origens dos dados</i>	40
4.3.3 <i>Integração e organização dos dados no datalake</i>	42
4.3.4 <i>Regras de tratamento e padronização</i>	45
4.3.5 <i>Governança e validação interna dos dados</i>	45
4.4 Avaliação da eficiência da implantação da automatização	46
4.5 Visualização e análise das emissões	47
4.6 Redução de tempo associada ao estudo	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1 Revisão de inventários anteriores e volume de dados levantados	49
5.1.1 <i>Processos e parâmetros aplicáveis a unidade operacional</i>	49
5.1.2 <i>Atualizações no mapeamento de entradas e saídas</i>	51
5.1.3 <i>Estruturação da base de dados</i>	55
5.1.4 <i>Rastreabilidade das informações e regras de padronização</i>	56
5.1.5 <i>Governança e validação interna</i>	57
5.2 Eficiência e validação da automatização de dados	59
5.2.1 <i>Comparativo entre o inventário manual e o inventário automatizado</i>	60
5.2.2 <i>Auditoria por terceira parte</i>	61
5.3 Visualização e análise de emissões	62
5.4 Redução de tempo associada	65
6 CONCLUSÃO	68
7 REFERÊNCIAS	70
APÊNDICES	76
ANEXOS	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Processo produtivo do aço em rota integrada (simplificado)	17
Figura 02 - Processo produtivo do aço em rota semi-integrada (simplificado)	18
Figura 03 - Aglomerados de Minério de Ferro: Sínter e Pelotas	19
Figura 04 - Metodologia WSA para cálculo de emissões de CO ₂	36
Figura 05 - Forma de Determinação dos Dados	57
Figura 06 - Painel de Validação “Production/Use”	58
Figura 07 - Tela para visualização das emissões absolutas e específicas por parâmetro ..	63
Figura 08 - Tela para visualização gerencial dos indicadores	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Modelo de recebimento de dados (Produção e Uso).....	42
Tabela 02 - Modelo de recebimento de dados (Geral)	43
Tabela 03 - Processos operacionais existentes na unidade operacional	49
Tabela 04 - Codificação dos parâmetros (insumos e produtos) aplicáveis a unidade	50
Tabela 05 - Consolidado final das alterações mapeadas para o inventário	52
Tabela 06 - Volume de dados e origens mapeados.....	55
Tabela 07 - Comparativo (Inventário Manual x Automatizado)	61
Tabela 08 - Redução de tempo associada a automatização de dados	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Valores do GWP dos gases de efeito estufa segundo o AR6 (IPCC).....	25
Quadro 02 - Caracterização da unidade operacional em estudo	35

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
BOF	<i>Blast Oxygen Furnace</i>
CBEs	Cotas Brasileiras de Emissão
CSRD	<i>Corporate Sustainability Reporting Directive</i>
COP	Conferência das Partes
CH ₄	Gás Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
CO _{2e}	Dióxido de carbono equivalente
CRVEs	Reduções ou Remoções Verificadas de Emissões
EAF	<i>Electric Arc Furnace</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
ESRS	<i>European Sustainability Reporting Standards,</i>
EU	União Europeia
EU ETS	Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia
FEA	Forno Elétrico a Arco
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HFCs	Hidrofluorcarbonos
IABr	Instituto Aço Brasil
IBÁ	Instituto Brasileiro de Árvores
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
LD	<i>Linz-Donawitz</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
NF ₃	Trifluoreto de nitrogênio
NO ₂	Óxido Nitroso
MRV	Monitoramento, Reporte e Verificação

ONU	Organização das Nações Unidas
PFCs	Perfluorcarbonos
PNA	Plano Nacional de Adaptação a Mudança do Clima
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
TI	Tecnologia da Informação
WSA	World Steel Association

1 INTRODUÇÃO

O aço é um dos materiais mais importantes para o desenvolvimento da sociedade moderna, devido a sua versatilidade, resistência e reciclabilidade (ARCELORMITTAL BRASIL, 2024a). Sua aplicação se estende a diversos setores, como construção civil, automotivo, energia, transporte e bens de consumo, desempenhando um papel essencial na infraestrutura global e no progresso tecnológico. Por essa razão, o aço tornou-se um pilar da economia moderna e uma *commodity*¹ estratégica em nível mundial (WSA, 2024).

A produção de aço, entretanto, é um processo que consome muita energia e é responsável por uma parcela considerável das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂). Seja pela queima de combustíveis fósseis para geração de energia ou pelas reações químicas envolvidas na transformação do minério de ferro em aço, a siderurgia é uma das principais indústrias contribuintes para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (IEA, 2023).

Neste cenário, de acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2021), os inventários GEE se tornam instrumentos fundamentais para mapear de forma detalhada as emissões e identificar as principais fontes de carbono, servindo de base para o desenvolvimento de estratégias de mitigação. No entanto, a confiabilidade dos dados é um fator crucial, uma vez que informações imprecisas podem comprometer a eficácia das ações, minar a confiança dos *stakeholder*² e dificultar a conformidade com regulamentações (BRASIL, 2021).

A crescente pressão regulatória e social por práticas empresariais mais sustentáveis tem levado grandes indústrias, especialmente setores intensivos em carbono como o da siderurgia, a adotarem processos mais precisos e transparentes para monitorar e reportar suas emissões de gases de efeito estufa. Com a entrada em vigor do *Corporate Sustainability Reporting Directive* (CSRD) pela União Europeia, as empresas são obrigadas a fornecer

¹ Bens básicos, geralmente matérias-primas, comercializados em mercados globais.

² Partes interessadas ou afetadas por um projeto ou organização.

relatórios detalhados sobre suas emissões, atendendo a critérios rigorosos de transparência e rastreabilidade (IBM, 2023).

Dessa maneira, é essencial garantir que os dados que compõem os inventários sejam rastreáveis e confiáveis. Além disso, um inventário que ofereça alta capacidade analítica, como a capacidade de mapear a contribuição de gases por fonte e processo, representa um diferencial significativo. A realização de cálculos e análises por meio de planilhas da Microsoft Excel®, sem o suporte de ferramentas automatizadas, é um processo demorado, desafiador e mais suscetível a erros humanos. Por essa razão, o uso de soluções automatizadas tem se tornado uma alternativa importante para as organizações (WAYCARBON, 2022).

Entre as metodologias disponíveis para a elaboração de inventários corporativos de emissões de GEE, destaca-se o *GHG Protocol*, amplamente adotado em escala global. Essa ferramenta fornece diretrizes padronizadas para mensuração, reporte e gerenciamento das emissões, permitindo que empresas de diferentes portes e setores estabeleçam um base comparável e transparente para sua performance ambiental. No Brasil, essa abordagem tem sido fortemente difundida por meio da plataforma do Programa Brasileiro *GHG Protocol*, promovendo uma cultura de transparência e engajamento voluntário na agenda climática (FGV, 2025).

Além do *GHG Protocol*, há também metodologias setoriais, que oferecem parâmetros mais específicos às características de determinados segmentos industriais. No caso da indústria do aço, a WSA disponibiliza uma abordagem técnica adaptada à realidade do setor, permitindo maior precisão na estimativa das emissões associadas ao processo siderúrgico. A adoção dessa metodologia contribui para uma análise mais fidedigna das fontes emissoras e facilita a comparação entre unidades operacionais e *benchmarks* internacionais (WSA, 2024b).

Neste contexto, o presente estudo visa viabilizar a implantação de uma ferramenta de automatização para coleta de dados e cálculo das emissões para desenvolvimento de inventários de gases de efeito estufa (GEE) em uma unidade operacional, localizada no estado de Minas Gerais, pertencente a uma multinacional da indústria do aço, com base na metodologia da WSA. A iniciativa surgiu da necessidade de aprimorar a gestão das emissões, reduzindo o esforço operacional envolvido na coleta, consolidação e reporte de dados, ao

mesmo tempo em que se buscava maior rastreabilidade e frequência na atualização das informações. Nesse cenário, observou-se a importância de automatizar etapas críticas do inventário de GEE, garantindo não apenas maior eficiência e padronização nos processos, mas também aumentando a confiabilidade das informações reportadas e a capacidade de resposta da empresa frente às demandas regulatórias e aos compromissos com a sustentabilidade corporativa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Viabilizar a implementação de uma ferramenta automatizada para coleta de dados e cálculo das emissões de gases de efeito estufa em uma unidade siderúrgica, com base na metodologia da *World Steel Association*, visando aprimorar a rastreabilidade, a padronização e a confiabilidade das informações, em alinhamento as diretrizes corporativas de reporte de emissões.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar os parâmetros e origens de dados necessários a elaboração do inventário de GEE, considerando as emissões dos Escopos 1, 2 e 3.
- Desenvolver um *dashboard* no *Power BI* que permita a visualização, validação e análise detalhada das emissões de GEE da empresa por escopo, fonte e outros critérios relevantes.
- Avaliar a redução associada ao tempo do processo de coleta e relato de dados de emissões, comparado a métodos manuais.
- Avaliar a eficácia da tecnologia implementada visando sua melhoria contínua.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A Indústria do Aço

O aço é uma liga metálica ferro-carbono em que o ferro participa pelo menos com 98% e o carbono com até 2%. Entre outras propriedades, apresenta resistência mecânica, maleabilidade e ductilidade, principais características necessárias as suas diversas aplicações (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

A história do aço remete a milhares de anos, começando com o uso de ferro meteórico por civilizações antigas e evoluindo com a descoberta do aço como subproduto do trabalho com ferro. Entretanto, a produção de aço só ganhou relevância global durante a Revolução Industrial, impulsionada por inovações como o processo de *Bessemer* no século XIX, que viabilizou a produção em larga escala (WSA, 2023).

Atualmente, o aço é o material mais empregado industrialmente na fabricação de bens de produção e de consumo, seja na fabricação de equipamentos, máquinas, ferramentas ou de componentes para os setores metalomecânico, automotivo, agrícola, naval, civil, de óleo e gás, energia, aeronáutico, entre outros (ABM, 2024).

No ano de 2023, a produção mundial de aço bruto alcançou 1.892 milhões de toneladas, com o Brasil ocupando a 9ª posição no *ranking* mundial ao produzir 32 milhões de toneladas. Na América Latina, o Brasil destaca-se como o maior produtor, representando aproximadamente 54,9% da produção total de aço (IABr, 2024a).

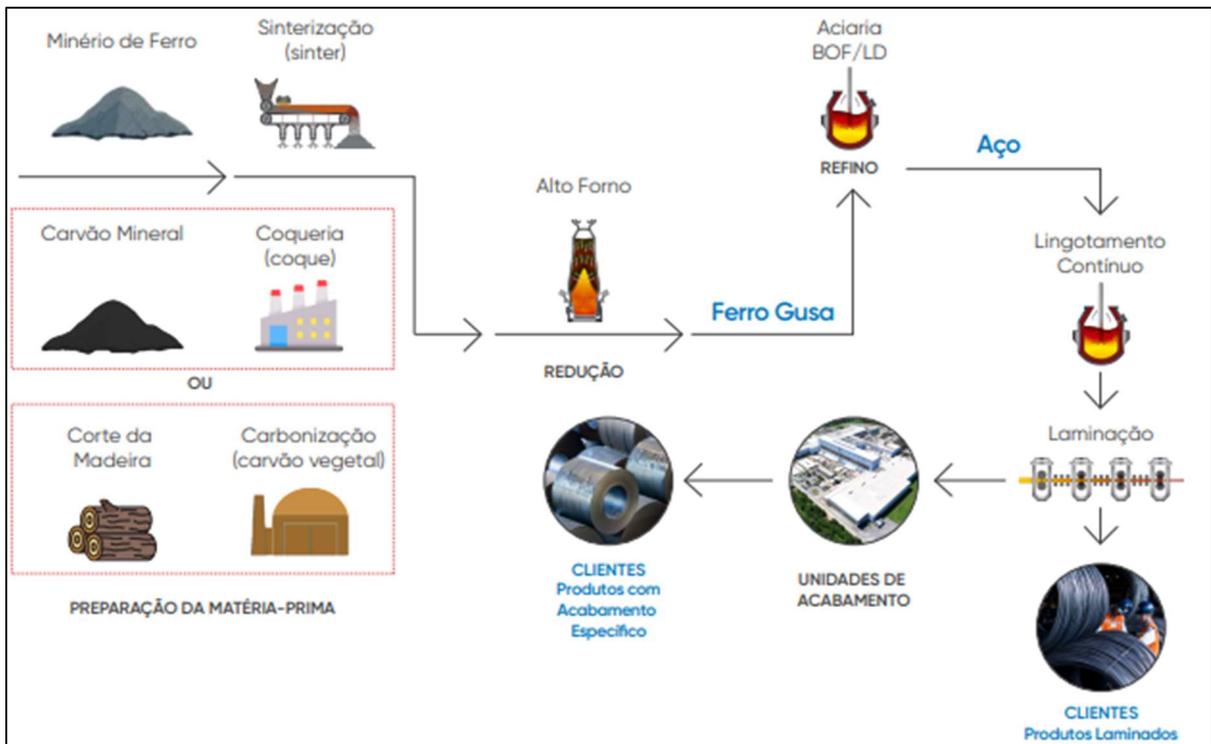
A distribuição setorial das vendas de produtos siderúrgicos no Brasil reflete a relevância da siderurgia em diversos setores econômicos. De acordo o Anuário Estatístico 2024 do Instituto Aço Brasil (IABr), no ano de 2023, o setor de construção civil liderou o consumo, sendo responsável pela maior parte das vendas, seguido pelos segmentos de bens de capital e indústria automotiva, que também demandam volumes significativos de aço. Além disso, setores como utilidades domésticas, embalagens metálicas e equipamentos agrícolas têm mostrado crescimento consistente (IABr, 2024b).

3.2 Processo Produtivo Siderúrgico

Atualmente, a siderurgia mundial segue duas rotas tecnológicas básicas: as usinas integradas, responsáveis por cerca de 70% da produção mundial, e as semi-integradas, responsáveis pelos outros 30% da produção (WSA, 2025).

De acordo com Mourão (2007), nas usinas integradas a produção é dividida em três fases: a redução, o refino e a laminação (Figura 01). Nesta classificação, o processo ocorre desde a escolha e preparação da matéria-prima, onde o principal insumo é o minério de ferro, que é transformado em ferro-gusa no alto-forno, posteriormente em aço líquido na aciaria e produto final nos laminadores.

Figura 01 – Processo produtivo do aço em rota integrada (simplificado)

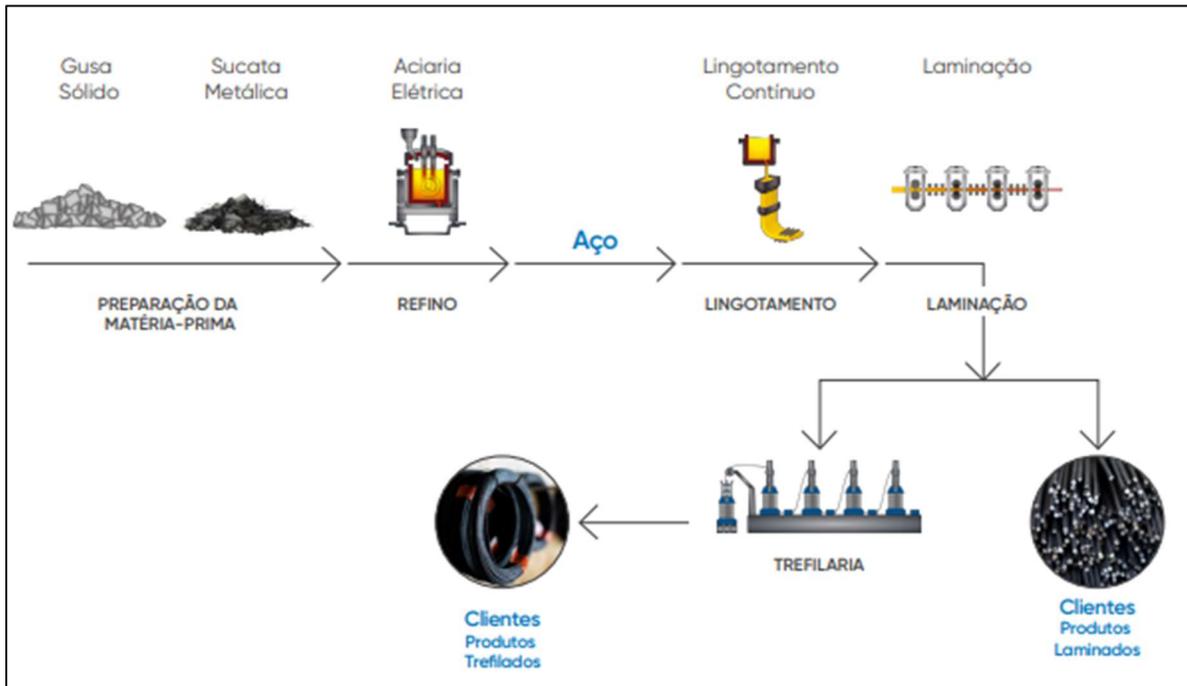


Fonte: ARCELORMITTAL BRASIL (2023).

As matérias-primas essenciais para siderúrgicas integradas são: minérios, redutores, combustíveis, fundentes, sucatas, ferros-liga, desoxidantes, dessulfurantes e refratários. As utilidades são água, oxigênio e energia elétrica (MOURÃO, 2007).

As usinas siderúrgicas semi-integradas não contemplam a etapa de redução, portanto, começam seu processo na aciaria, na qual são alimentadas principalmente por sucata ferrosa e ferro-gusa (Figura 02). Nesta classificação de usina, a carga metálica é fundida a temperaturas elevadas com o uso de fornos elétricos a arco (FEA) (CARVALHO; MESQUITA; MELO, 2015).

Figura 02 – Processo produtivo do aço em rota semi-integrada (simplificado)



Fonte: ARCELORMITTAL BRASIL (2023).

As siderúrgicas semi-integradas necessitam, essencialmente, de: sucatas, fundentes, ferros-liga, refratários e as mesmas utilidades de uma usina integrada, porém, com grande consumo de energia elétrica, uma vez os fornos elétricos a arco possuem uma alta demanda de eletricidade para gerar as altas temperaturas necessárias a fusão das sucatas (MOURÃO, 2007).

3.2.1 Preparação das Matérias-Primas

3.2.1.1 Aglomeração do Minério de Ferro

Do ponto de vista metalúrgico, o minério de ferro classifica-se em três categorias principais, com base na sua granulometria: minério granulado, finos para sinter (*sinter feed*) e finos para

pelotas (*pellet feed*). O minério granulado e os finos representam os principais produtos extraídos diretamente da mina, enquanto o sinter e as pelotas são obtidos posteriormente por meio de processos de aglomeração, a fim de atender as especificações exigidas pelas siderúrgicas nos altos-fornos (BNDES, 2014).

A etapa de aglomeração é, portanto, fundamental no processamento do minério de ferro, pois permite transformar as partículas finas em materiais com granulometria, propriedades físicas e características metalúrgicas adequadas para o processo de redução. Os dois processos de aglomeração amplamente utilizados na siderurgia são a sinterização e a pelotização (ABM, 2024), que originam, respectivamente, o sinter e as pelotas (Figura 03).

Figura 03 – Aglomerados de Minério de Ferro: Sinter e Pelotas



Fonte: ABM (2024).

Na sinterização, emprega-se o *sinter feed*, constituído por minério de ferro com granulometria entre 0,15 mm e 8,0 mm. Esse material, misturado com fundentes, combustíveis sólidos e outros aditivos, é submetido a um processo térmico, no qual as partículas finas são parcialmente fundidas, resultando na formação de uma estrutura porosa e resistente denominada sinter, que apresenta boa permeabilidade e resistência para utilização nos altos-fornos (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA 2010).

Na pelotização, por sua vez, utiliza-se o *pellet feed*, composto por ultrafinos de minério de ferro com granulometria inferior a 0,15 mm (MOURÃO, 2007). Esses finos passam por uma mistura, aglomeração em pelotas, a secagem e, por fim, a queima em altas temperaturas adquirindo elevada resistência mecânica e estabilidade térmica (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA 2010).

Tanto o sinter quanto as pelotas devem atender a critérios de qualidade metalúrgica, como resistência mecânica, basicidade adequada, reatividade a redução e baixa geração de finos, pois tais propriedades influenciam diretamente no rendimento operacional, no consumo energético e na formação de escória. Além disso, o uso eficiente dessas matérias-primas está diretamente ligado as estratégias de descarbonização da siderurgia, uma vez que cargas de maior qualidade reduzem o consumo específico de combustível fóssil (ZHANG; GUO, 2025).

3.2.1.2 Coqueificação

A coqueificação é o processo térmico de transformação do carvão mineral em coque, por meio de pirólise, ou seja, aquecimento na ausência de oxigênio. Durante o processo, o carvão é submetido a temperaturas em torno de 1000°C (MOURÃO, 2007), promovendo a decomposição de sua estrutura orgânica e a liberação de componentes voláteis na forma de gases e vapores.

Como produto final do processo obtém-se o coque, um material sólido, poroso e com alto teor de carbono fixo, que apresenta elevada resistência mecânica, estabilidade térmica e boa capacidade de permeabilidade aos gases. Essas propriedades tornam o coque um insumo fundamental no processo de redução dos altos-fornos, atuando tanto como agente redutor quanto como fonte de energia térmica (DORILEO et al., 2010).

3.2.1.3 Carbonização da Madeira

O carvão vegetal é produzido por meio da pirólise da madeira, um processo em que a madeira é aquecida a altas temperaturas e baixa quantidade de oxigênio. Durante essa decomposição térmica, ocorre a eliminação da maior parte dos componentes voláteis presentes na madeira, como água e gases, o que resulta na concentração de carbono. Esse processo é comumente denominado "carbonização da madeira", uma vez que transforma a estrutura original da madeira em um material com maior densidade de carbono, sendo mais eficaz como combustível (ABM, 2024).

Esse material é amplamente utilizado na siderurgia como uma alternativa renovável ao coque mineral. Segundo o Instituto Aço Brasil, em 2023, 12% da produção brasileira de aço bruto

foi obtida via rota integrada a carvão vegetal. Esse é um diferencial significativo para o país, que é responsável por aproximadamente um terço da produção mundial de carvão vegetal, o qual é, em sua maior parte, produzido de forma sustentável a partir de florestas plantadas, como o eucalipto (JUNQUEIRA, 2020).

Além disso, o uso do carvão vegetal na produção de aço desempenha um papel importante na redução do balanço global de emissões de gases de efeito estufa. Isso ocorre porque as florestas plantadas, responsáveis pela produção do carvão vegetal, absorvem uma quantidade significativa de CO₂ durante seu ciclo de crescimento. Esse carbono absorvido pode compensar parcialmente as emissões de CO₂ geradas durante o processo de carbonização e no próprio processo industrial da siderurgia. Portanto, ao utilizar carvão vegetal, é possível criar um ciclo mais equilibrado de captura e liberação de carbono, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais do setor (IBÁ, 2025).

Entretanto, a rota integrada a carvão vegetal possui limitações técnicas e operacionais que restringem a produção de aço em larga escala (ABM, 2024). Entre essas limitações estão a dificuldade em atender a demanda crescente, a dependência de matéria-prima de qualidade e os altos custos logísticos, restringindo seu uso a escalas menores. Além disso, a tecnologia atual ainda depende do carvão mineral em grandes fornos, devido a necessidade de maior calor e estabilidade no processo de redução do ferro (SABLOWSKI, 2008).

3.2.2 Redução

O processo de redução para a produção de ferro-gusa ocorre nos altos-fornos, em que os óxidos de ferro, como o Fe₂O₃, reagem com carbono e ar. Durante esse processo, a reação do carbono com o ar gera energia térmica e monóxido de carbono (CO), que atua na redução do Fe₂O₃ (MORAIS, 2008). Para isso, podem ser utilizados dois tipos principais de redutores: carvão vegetal ou coque.

As principais reações químicas do processo são (JACOMINO et al, 2002):





Os materiais carregados no alto-forno, incluindo minério de ferro, carvão vegetal ou coque, e fundentes como quartzo, calcário e dolomita, são transformados em produtos finais: gusa líquido, escória e gás de alto-forno (MORAIS, 2008). Além disso, podem ainda ser injetados combustíveis auxiliares como o carvão pulverizado, o gás natural e óleos combustíveis (ABM, 2024)

Os fundentes desempenham a função de auxiliar na remoção das impurezas do minério, sendo os óxidos e carbonatos os mais utilizados. Dessa forma, a partir da reação entre os fundentes e as impurezas do minério, tem-se a formação da escória que, devido a sua menor densidade em relação ao ferro-gusa, o protege da oxidação pelo contato com o ar. (MOURÃO, 2007; ABM, 2024).

3.2.3 Refino Primário

Após a redução, o ferro-gusa é levado a aciaria para seu refino e transformação em aço. Em 2023, aproximadamente 70% da produção mundial de aço ocorreu por meio do processo da aciaria LD enquanto, as aciarias elétricas representaram aproximadamente 30% desse montante (WSA, 2025).

O processo *LD* (*Linz Donawitz*) ou *BOF* (*basic oxygen furnace*) teve início em meados do século XX e é amplamente utilizado para o refino primário do aço. Esse processo possui como principais matérias-primas o gusa líquido, sucatas de aço e ferro fundido, minério de ferro, cal, dolomita e oxigênio além de calcário e outros fundentes (MOURÃO, 2007; ABM, 2024).

No processo *LD* para fabricação de aço, o principal objetivo das reações de refino é a oxidação parcial, por meio de sopro de oxigênio, de elementos como carbono, manganês,

silício, fósforo e outras impurezas contidas no gusa líquido, além da redução do teor de enxofre (MOURÃO, 2007; BORGES, 2016).

A produção de aço via forno elétrico a arco possui como matéria-prima principal a sucata de aço e a energia elétrica. Nesse processo, ocorre a fusão do material a partir da energia elétrica, convertida em calor através da radiação de arcos elétricos criados entre os eletrodos e a sucata (ABM, 2024; MOURÃO, 2007).

Outras matérias-primas necessárias ao processo FEA são elementos de liga, formadores de escória e fonte de carbono (ECHTERHOF, 2021). Além disso, o ferro esponja e o ferro-gusa também costumam ser utilizados na composição da carga utilizada nos fornos elétricos (PAULA; ARAÚJO; FURTADO, 2011).

A produção de aço via FEA se destaca em termos ambientais por permitir a utilização intensiva de sucata como matéria-prima, reduzindo a dependência do minério de ferro e diminuindo as emissões de gases de efeito estufa (MOURÃO, 2007; ABM, 2024).

3.2.3 Refino Secundário

O refino secundário, realizado fora dos equipamentos de fabricação de aço bruto (FEA ou LD) é um processo que engloba a homogeneização térmica e química do aço (MOURÃO, 2007). Nessa etapa, também são adicionadas ferros-ligas ao aço líquido, possibilitando a obtenção de diferentes composições químicas e propriedades, de acordo com as às exigências específicas de aplicação (TORRES, 2023).

Entre os procedimentos mais comuns estão a desoxidação, dessulfuração, desgaseificação e descarburização. Isso ocorre pois, nos equipamentos de fabricação de aço bruto, a remoção de algumas impurezas é limitada. Dessa forma, após o processamento inicial, o aço líquido é transferido para um recipiente denominado panela, que desempenha um papel fundamental como reator metalúrgico nas operações de refino secundário (ABM, 2024).

3.2.4 Lingotamento Contínuo

Nessa fase, ocorre a solidificação do aço em uma forma contínua a partir da máquina de lingotamento contínuo. Essa solidificação deixa o aço em um formato pré-determinado,

como lingotes, de maneira que possam ser utilizados nas etapas seguintes da cadeia produtiva da siderurgia (ABM, 2024).

3.2.5 Laminação

Na fase da laminação é onde ocorre a conformação mecânica dos lingotes, transformando-os em produtos como chapas, placas, tarugos e perfis. Esse processo é realizado por meio da passagem do metal, geralmente em estado sólido e aquecido, entre dois ou mais cilindros rotativos, que aplicam forças de compressão para reduzir a espessura ou alterar o formato do material (MOURÃO, 2007). O fio-máquina, obtido na etapa de laminação, é a matéria-prima utilizada no processo de trefilação, que resulta em produtos com maior valor agregado e aplicação em diversos setores industriais.

3.2.6 Trefilação

A trefilação é um processo de conformação mecânica utilizado para reduzir a seção transversal do aço. Esse processo, amplamente aplicado na fabricação de produtos como arames, cabos, hastes e tubos, acarreta a redução da largura do material, conseqüentemente aumentando o seu comprimento (MORAIS, 2017).

3.3 Mudanças Climáticas

As mudanças climáticas, fenômeno conhecido pelo seu efeito de transformação nos padrões de temperatura e clima da terra, constituem um dos maiores, senão o maior desafio, dentre os novos problemas globais que afetam a humanidade, ao qual se acumulam dificuldades em perspectiva científica, política, social e econômica. (CAMPELLO, 2018)

A mudança do clima, incluindo aumentos na frequência e intensidade dos eventos extremos, impactam negativamente a segurança alimentar e os ecossistemas terrestres, além contribuírem para a desertificação e degradação da terra em muitas regiões (IPCC, 2021).

Embora as mudanças climáticas possam ocorrer por causas naturais, como por meio de variações no ciclo solar, a Organização das Nações Unidas (ONU) aponta que, desde o início do século XIX, as atividades humanas se tornaram o principal impulsionador dessas

transformações, devido, principalmente, a queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás, os quais emitem grandes quantidades de GEE na atmosfera (ONU, 2025).

3.3.1 Gases de Efeito Estufa

Em 2023, foi publicado o relatório do Sexto Ciclo de Avaliação (AR6) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), que apresenta com alta confiança que a única maneira de conter o avanço das temperaturas e evitar que o mundo atinja a marca de risco de 2°C é freando as emissões de gases do efeito estufa (IPCC, 2023).

Os principais GEE presentes na atmosfera são o gás carbônico ou dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), trifluoreto de nitrogênio (NF₃), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆). Dentre esses gases, o dióxido de carbono (CO₂) é responsável por 74% das emissões globais de gases de efeito estufa. Apesar de gases como metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) contribuírem com uma fração menor das emissões totais, sua alta capacidade de aquecimento global os torna extremamente impactantes no contexto climático (WRI, 2024).

A partir disso, a conversão de GEEs em dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) é um procedimento fundamental para avaliar e comparar as contribuições de diferentes gases para o aquecimento global. Essa métrica padronizada utiliza o Potencial de Aquecimento Global (GWP, do inglês *Global Warming Potential*) como parâmetro central, permitindo traduzir as emissões de diversos gases em termos de uma referência comum: o dióxido de carbono (IPAM AMAZÔNIA, 2015).

Quadro 1 - Valores do GWP dos gases de efeito estufa segundo o AR6 (IPCC).

Nome químico comum	Fórmula química	Valor GWP (Sexto Relatório de Avaliação - AR6) (para um horizonte de 100 anos)
Dióxido de carbono	CO ₂	1

Nome químico comum	Fórmula química	Valor GWP (Sexto Relatório de Avaliação - AR6) (para um horizonte de 100 anos)
Metano – não fóssil	CH ₄	27
Metano – fóssil	CH ₄	29,8
Óxido nitroso	N ₂ O	273
Trifluoreto de nitrogênio	NF ₃	17400
Hexafluoreto de enxofre	SF ₆	24300
Hidrofluorcarbonos	HFCs	De 4,84 até 14600 (a depender do gás)
Perfluorcarbonos	PFCs	De 0,09 até 12400 (a depender do gás)

Fonte: Adaptado de IPCC (2024a)

A maior parcela das emissões globais de gases de efeito estufa, cerca de 75,7%, é atribuída ao setor de energia, que abrange transporte, geração de eletricidade e calor, manufatura e construção, edifícios e emissões fugitivas. Outros setores contribuem significativamente, como agropecuária (12%), mudanças no uso da terra e silvicultura (6,5%), processos industriais e uso de produtos (IPPU) (5,6%) e gestão de resíduos, incluindo aterros e efluentes (3,2%). O sub-setor do ferro e do aço, isoladamente, é responsável por, aproximadamente, 7 a 9% das emissões globais e consome cerca de 7% da energia fornecida (KPMG, 2024).

No Brasil, de acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, a produção de ferro e aço é a principal fonte de emissões de gases de efeito estufa no setor de processos industriais e uso de produtos (IPPU), representando, aproximadamente, 5% da emissão total nacional (OBSERVATÓRIO DA MINERAÇÃO, 2022).

3.3.2 Acordos Globais para o Clima

As questões ambientais começaram a ser tratadas em âmbito global a partir da Conferência de Estocolmo, realizada em 1972, mas foi somente com a Primeira Conferência Mundial sobre o Clima, promovida pela Organização Meteorológica Mundial (WMO) em 1979, que o aquecimento global passou a ganhar maior relevância no cenário internacional (MOREIRA; BUENO, 2008).

Naquela ocasião, os países participantes concluíram que atividades como a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento e as alterações no uso do solo haviam elevado os níveis de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera em 15% ao longo do século anterior a realização da Conferência (BRAZ, 2003).

Além disso, a Primeira Conferência Mundial colaborou para tornar possível, anos mais tarde, em 1988, o estabelecimento do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Esse órgão científico da Organização das Nações Unidas tem como objetivo avaliar, cientificamente, as informações relacionadas as mudanças climáticas, seus impactos, riscos e estratégias de mitigação e adaptação (BRASIL, 2021).

Em 1992, o Rio de Janeiro foi sede da Eco/92, que resultou na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas com 154 países signatários (BRAZ, 2003). Essa convenção propôs conferências regulares para monitorar avanços e revisar medidas voltadas a redução de gases de efeito estufa, estabelecendo normas básicas para limitar emissões de dióxido de carbono e outros gases. Sendo assim, responsável por estabelecer um princípio norteador de atuação para o enfrentamento as mudanças climáticas (CAMPELLO, 2018).

Como um passo seguinte a Convenção-Quadro as partes signatárias da Convenção-Quadro reuniram novamente, em 1997, para a Terceira Conferência das Partes (COP3), realizada na cidade de Quioto, Japão. Como resultado, foi adotado o Protocolo de Quioto que estabeleceu metas de redução e mitigação de emissões aos países para o período de 2005 a 2012 (CAMPELLO, 2018). Este foi o primeiro tratado internacional com compromissos específicos, vinculantes e definitivos para reduzir as emissões de GEE, sendo ratificado por países que representavam pelo menos 55% das emissões globais. O Brasil, embora não estivesse obrigado a reduzir emissões por ser um país em desenvolvimento, aderiu

voluntariamente ao protocolo em 2002, comprometendo-se a adotar medidas para limitar o crescimento das emissões e incentivar práticas sustentáveis. (AGÊNCIA SENADO, 2022).

O compromisso global mais recente para limitar o aumento da temperatura do planeta a menos de 2°C foi firmado em 2015, durante a COP 21 (21ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas), com a assinatura do Acordo de Paris por 195 países. Este tratado entrou em vigor em 4 de novembro de 2016, estabelecendo metas ambiciosas (WWF, 2022). O Acordo de Paris tem como objetivo “fortalecer a resposta global a ameaça da mudança climática, no contexto de desenvolvimento sustentável e dos esforços de erradicação de pobreza” (art. 2.1) (ACORDO DE PARIS, 2015) para:

- (a) manter o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, e envidar esforços para limitar esse aumento da temperatura a 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e os impactos da mudança do clima; (b) aumentar a capacidade de adaptação aos impactos negativos da mudança do clima e promover a resiliência a mudança do clima e um desenvolvimento de baixa emissão de gases de efeito estufa, de uma maneira que não ameace a produção de alimentos; e (c) tornar os fluxos financeiros compatíveis com uma trajetória rumo a um desenvolvimento de baixa emissão de gases de efeito estufa e resiliente a mudança do clima .

3.3.3 Pacto Ecológico Europeu

Como um importante desdobramento do Acordo de Paris, a União Europeia (UE) apresentou em 2021 o “Pacto Ecológico Europeu (do inglês, “*European Green Deal*”). Nesse pacto, os 27 países membros comprometeram-se a transformar a UE no primeiro continente com impacto neutro no clima até 2050 (COMISSÃO EUROPEIA, 2021). A UE utiliza o Pacto Ecológico como uma forma de liderar no cumprimento das metas do Acordo de Paris, incentivando outras nações a adotarem compromissos climáticos mais ambiciosos (COMISSÃO EUROPEIA, 2021).

Em 2023, como apoio ao Pacto Ecológico Europeu a UE declarou a adoção da *Corporate Sustainability Reporting Directive* (CSRD), diretiva que exige que as empresas da UE, incluindo subsidiárias qualificadas de empresas não pertencentes a UE, divulguem seus

impactos ambientais e sociais e como suas ações ambientais, sociais e de governança afetam seus negócios (COMISSÃO EUROPEIA, 2021). No Brasil, a CSRD influencia significativamente as empresas brasileiras com atividades na UE ou que mantenham relações comerciais com empresas europeias.

As empresas sujeitas a CSRD terão que apresentar relatórios de acordo com os Padrões Europeus de Relatórios de Sustentabilidade (ESRS), desenvolvidos pelo *European Financial Reporting Advisory Group* (EFRAG) (UNIÃO EUROPEIA, 2022).

Os ESRS descrevem as métricas que as empresas devem relatar e como reportá-las para cumprir os requisitos de divulgação da CSRD, garantindo que as empresas forneçam informações detalhadas, consistentes e padronizadas. Abrange assim, diversas dimensões da sustentabilidade, como questões ambientais, sociais e de governança. Entre os ESRS, destaca-se o ESRS E1, voltado para o clima, que exige que as empresas relatem suas emissões GEE, planos de transição para uma economia de baixo carbono, riscos relacionados as mudanças climáticas e metas alinhadas aos compromissos do Acordo de Paris (EFRAG, 2022).

3.3.4 Legislação e Política Climática no Brasil

No Brasil, o compromisso com a agenda climática foi consolidado por meio da criação de uma estrutura legal e institucional voltada a adaptação e mitigação as mudanças do clima. Nesse sentido, o principal marco é a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída pela Lei nº 12.187/2009, que estabeleceu os fundamentos para a integração da temática nas políticas públicas e estratégias de desenvolvimento sustentável do país (BRASIL, 2009).

Em 2015, com a assinatura do Acordo de Paris, o Brasil apresentou sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), comprometendo-se, de forma voluntária, a reduzir em 37% suas emissões de GEE até 2025, com uma meta indicativa de 43% até 2030, tomando como base o ano de 2005 (BRASIL, 2015). Para cumprir essas metas, o país adotou uma série de estratégias setoriais, como o Plano ABC+ (Agricultura de Baixo Carbono), voltado a implementação de práticas sustentáveis no setor agropecuário, e o Plano Nacional de

Adaptação a Mudança do Clima (PNA), que visa aumentar a resiliência de setores e populações vulneráveis (BRASIL, 2016).

Entre os avanços mais significativos está o Projeto PMR Brasil (*Partnership for Market Readiness*), desenvolvido entre 2016 e 2020, sob coordenação do Ministério da Fazenda e com apoio técnico e financeiro do Banco Mundial. Essa iniciativa teve como objetivo principal estudar a viabilidade da implementação de instrumentos de precificação de carbono, como sistemas de comércio de emissões e mecanismos tributários, a partir de diagnósticos regulatórios, análise de impacto econômico e consulta com setores estratégicos da economia (PMR BRASIL, 2018).

Como desdobramento do PMR Brasil, o governo federal publicou o Decreto nº 11.075/2022, que estabeleceu os procedimentos para elaboração dos planos setoriais de mitigação e regulamentou a criação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) (BRASIL, 2022). Posteriormente, a Lei nº 15.042/2024 formalizou o SBCE como um mercado regulado de carbono, em que os operadores econômicos terão limites obrigatórios de emissão e deverão adquirir Cotas Brasileiras de Emissão (CBEs) ou comprovar Reduções ou Remoções Verificadas de Emissões (CRVEs) para fins de conformidade (BRASIL, 2024).

O sistema será implementado de forma gradual e contará com mecanismos de monitoramento, reporte e verificação (MRV), um comitê gestor e penalidades proporcionais em casos de descumprimento. Esse mecanismo tem como finalidade assegurar que os dados sobre emissões declarados pelos operadores econômicos sejam precisos, consistentes e auditáveis, garantindo a integridade ambiental do sistema de comércio de emissões (BRASIL, 2024).

Dessa forma, a criação do SBCE insere o Brasil de forma mais estratégica no cenário global de finanças climáticas, aproximando-o de estruturas similares, como o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS), e favorecendo a transição para uma economia de baixo carbono. Contudo, a efetividade da legislação climática brasileira ainda depende da articulação entre os diferentes níveis de governo, da capacidade de fiscalização e do engajamento do setor privado. (PMR BRASIL, 2018; BRASIL, 2024).

3.4 Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa

Um Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa é o mapeamento das fontes emissoras de GEE de uma atividade, processo, organização, setor econômico, cidade, estado ou país, seguido da quantificação, monitoramento e registro dessas emissões. Quando realizado periodicamente, o inventário se torna uma importante ferramenta de gestão, permitindo identificar o perfil de emissões da entidade inventariante (WAYCARBON, 2016).

Em 1998, o *World Resources Institute* (WRI), nos Estados Unidos, desenvolveu o *GHG Protocol*, que estabelece métodos padronizados de contabilização para entender, quantificar e gerenciar os GEE. Essa metodologia é compatível com os métodos de quantificação do IPCC (BRASIL, 2008b). Para garantir a qualidade dos inventários, o *GHG Protocol* define princípios como relevância, integralidade, consistência, transparência e exatidão, que asseguram a inclusão de todas as fontes significativas, a comparabilidade temporal dos dados, a clareza dos métodos adotados e a redução de incertezas (IPCC, 2006; BRASIL et al., 2008a).

A elaboração de um inventário requer a aplicação de fatores de emissão, utilizados para converter dados de atividade (como quantidade de combustível consumido, quilometragem rodada ou produção de aço) em estimativas de emissões de gases. Esses fatores podem ser baseados em metodologias internacionais, como a do IPCC ou em fatores específicos desenvolvidos por instituições setoriais e governos nacionais (FGV, 2011).

Para avaliar o impacto climático de maneira abrangente, é necessário considerar as emissões diretas e indiretas por meio de três escopos (BRASIL, 2006b):

Escopo 1: emissões diretas de fontes que pertencem ou são controladas pela organização. São classificadas em 6 categorias (FGV, 2018):

1. Combustão estacionária: emissões de GEE provenientes da queima de combustível, em que ocorre sua oxidação. A energia gerada pela combustão geralmente é utilizada para produzir vapor de água ou energia elétrica.

2. Combustão móvel: emissões de GEE provenientes da queima de combustível, em que ocorre sua oxidação. A energia gerada pela combustão é utilizada para produzir movimento e percorrer um trajeto.
3. Processos industriais: emissões de GEE provenientes da transformação química ou física de algum
4. Resíduos sólidos e efluentes líquidos: emissões de GEE provenientes do tratamento de resíduos sólidos e de efluentes líquidos. As emissões podem ocorrer por decomposição em aterros sanitários, processo de compostagem, tratamento de efluentes, entre outros. A emissão decorrente da incineração de resíduos também está incluída nessa categoria.
5. Fugitivas: liberações de GEE, geralmente não intencionais, que não passam por chaminés, drenos, tubos de escape ou outra abertura funcionalmente equivalente. A liberação (escape) ocorre durante a produção, processamento, transmissão, armazenagem ou uso do gás.
6. Agrícolas: emissões não mecânicas de atividades de agricultura ou pecuária

Escopo 2: emissões indiretas associadas a energia elétrica ou térmica adquirida e consumida.

Escopo 3: outras emissões indiretas relacionadas a cadeia de valor, tanto a montante (*upstream*) quanto a jusante (*downstream*), é o único escopo do inventário de emissões da que não é de relato obrigatório. Essas emissões estão associadas, por exemplo, ao transporte, à aquisição de matérias-primas e ao uso de produtos comercializados. Para facilitar a identificação e o reporte dessas emissões, o Escopo 3 é subdividido em 15 categorias (Figura 01), organizadas conforme sua posição na cadeia de valor (IBM, 2025):

Emissões Upstream: relacionam-se às atividades que ocorrem antes da organização receber bens ou serviços, incluindo: bens e serviços adquiridos; bens de capital; atividades relacionadas a combustíveis e energia (não incluídas nos Escopos 1 ou 2); transporte e distribuição a montante; resíduos gerados nas operações; viagens de negócios; deslocamento de funcionários; ativos alugados a montante

Emissões Downstream: referem-se às atividades que ocorrem após os produtos ou serviços deixarem a organização, tais como: transporte e distribuição a jusante;

processamento de produtos vendidos; uso de produtos vendidos; tratamento de fim de vida dos produtos vendidos; ativos alugados a jusante; franquias; investimentos.

O *GHG Protocol* também admite duas abordagens organizacionais para delimitar o inventário: controle operacional (quando a empresa possui autoridade plena sobre as operações) e participação societária (quando a contabilidade considera a proporção de participação acionária da empresa em determinada atividade) (FGV, 2011).

No setor siderúrgico, destaca-se a metodologia desenvolvida pela *World Steel Association*, uma das maiores entidades industriais globais, que representa produtores e associações nacionais e regionais responsáveis por cerca de 85% da produção mundial de aço. A organização elaborou um modelo específico para o cálculo das emissões de GEE, adaptando os princípios do *GHG Protocol* a realidade operacional da indústria do ferro e aço. Essa abordagem considera diferentes rotas produtivas, insumos e tecnologias, garantindo a padronização e a comparabilidade dos dados entre as empresas do setor (WSA, 2024).

Entre os principais desafios na elaboração de inventários estão a obtenção de dados precisos, a redução de incertezas e a integração de informações de diferentes fontes. A adoção de sistemas informatizados e o cruzamento com bancos de dados têm se mostrado estratégias essenciais para melhorar a qualidade dos inventários (IPCC, 2006).

4 METODOLOGIA

4.1 Delimitação do Estudo

O estudo, desenvolvido a partir da necessidade de otimização do processo de elaboração de inventários de GEE, foi aplicado a uma unidade operacional de uma multinacional do setor siderúrgico. No Brasil, a empresa possui cinco unidades industriais, além de áreas de florestas plantadas destinadas a produção de carvão vegetal e duas unidades de mineração e beneficiamento de minério de ferro.

A escolha da unidade operacional considerou critérios técnicos, operacionais e estratégicos, alinhados ao objetivo de desenvolver uma solução escalável e representativa dentro da realidade industrial da empresa.

Entre as cinco unidades industriais que compõem o parque produtivo da companhia no segmento de aços longos no país, foi selecionada a segunda maior planta em termos de volume produtivo, localizada no município de Juiz de Fora (MG). Esta unidade operacional conta com uma capacidade instalada de aproximadamente 1,2 milhão de toneladas de aço bruto por ano e possui 41 anos de operação (DIÁRIO DO COMÉRCIO, 2024).

Seu processo produtivo adota uma rota híbrida, combinando a redução em alto-forno alimentado com carvão vegetal e o refino em aciaria elétrica conforme apresentado no Quadro 1. Como produtos finais, a unidade operacional produz barras, fio-máquina e trefilados.

Essa configuração possibilita a análise de diferentes tipos de fontes de emissão, oferecendo um escopo técnico abrangente e adequado para a validação da ferramenta automatizada de inventário.

Quadro 2 - Caracterização da unidade operacional em estudo

Tipo	Rota	Caracterização da unidade
Siderúrgica	Híbrida (Alto-Forno a Carvão Vegetal + Aciaria Elétrica)	A rota dessa planta consiste nas etapas de: 1. Redução em alto-forno a carvão vegetal, 2. Refino primário no forno elétrico a arco; 3. Refino Secundário; 4. Lingotamento Contínuo; 5. Laminação (Barras e Fio Máquina); 6. Trefilação; 7. Outros

Fonte: Autora (2025).

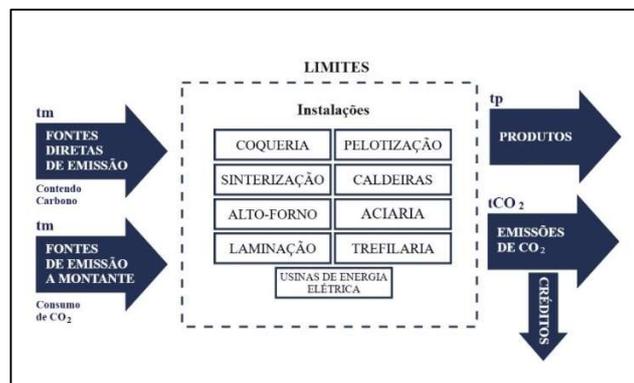
O inventário de GEE elaborado por essa unidade operacional possui caráter obrigatório, sendo atualmente reportado trimestralmente ao sistema corporativo global da empresa, com base nas diretrizes metodológicas da WSA. Com a implantação da automatização, esse processo deverá passar a ser realizado mensalmente, ampliando a frequência de atualização e permitindo um acompanhamento mais contínuo e preciso das emissões. Esse reporte integra os compromissos institucionais da organização relacionados a governança climática, transparência e monitoramento das emissões, exigindo alto grau de confiabilidade, padronização e rastreabilidade dos dados enviados.

Além de atender aos requisitos de reporte a nível mundial, o inventário automatizado tem também um papel estratégico no âmbito nacional, ao fornecer informações mais acessíveis, atualizadas e integradas para apoio a tomada de decisões internas. Os dados consolidados de forma automatizada podem ser utilizados para embasar iniciativas locais de descarbonização, identificar oportunidades de melhoria nos processos produtivos, monitorar a evolução de indicadores ambientais e subsidiar análises comparativas entre unidades. Dessa forma, a automatização não apenas assegura conformidade com os compromissos globais da empresa, mas também fortalece a gestão ambiental em nível local e contribui diretamente para a implementação de políticas corporativas de sustentabilidade.

4.2 Metodologia *World Steel Association* para Inventários *GEE*

A metodologia da WSA para inventários de emissões de gases de efeito estufa caracteriza-se por ser uma abordagem simplificada de contabilização de CO₂, desenvolvida com o propósito de fornecer uma ferramenta padronizada e economicamente viável para que empresas do setor siderúrgico possam monitorar a intensidade das emissões associadas aos seus processos produtivos (WSA, 2024). Alinhada aos princípios do *GHG Protocol* (relevância, integralidade, consistência, transparência e exatidão) a metodologia estabelece diretrizes claras para o cálculo das emissões (Figura 04), incorporando os conceitos de Escopos 1, 2 e 3.

Figura 04 - Metodologia WSA para cálculo de emissões de CO₂



Fonte: WSA (2024). Adaptado.

Dessa forma, para calcular a quantidade de emissão de CO₂ de acordo com a metodologia WSA é realizado um balanço de massa, onde são levados em consideração todos os produtos que possuem carbono em sua composição. Para o cálculo, deve-se multiplicar as toneladas de insumos consumidos por um fator de emissão equivalente, assim como as toneladas de materiais produzidos pelo seu respectivo fator de emissão.

A Figura 04 contém um esquema do balanço de massa da usina, também representado pela equação abaixo, onde tCO₂ é a quantidade de CO₂ emitido, em tonelada; t_m é a quantidade de material consumido (podendo ser em tonelada, MWh e outros) e t_p a quantidade de material produzido; FE_m é o fator de emissão em tCO₂/unidade material consumido e FE_p o fator de emissão em tCO₂/unidade produto produzido (Equação 4).

$$tCO_2 = \sum FEm \cdot tm - \sum FEp \cdot tp \quad (4)$$

Além disso, a metodologia estabelece diretrizes claras para os limites operacionais e para os insumos de material e energia que devem ser considerados durante a coleta dos dados de atividade. Ela também é transparente quanto as exclusões, como as de outros gases de efeito estufa que não o CO₂, incluindo metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆). Por fim, a abordagem adota o conceito dos Escopos 1, 2 e 3 para a contabilização das emissões (WSA, 2024).

Em relação aos fatores de emissão, o Anexo A lista todos os itens que devem ser considerados para as emissões do Escopo 1, incluindo o fator de emissão correspondente, a referência utilizada e a unidade de medida associada a cada material. De acordo com a WSA (2024), todos os fatores de emissão foram estruturados por um painel de especialistas da associação, e são amplamente utilizados ao redor do mundo.

Nas referências listadas no Anexo A, as designações específicas têm os seguintes significados: “worldsteel” refere-se ao painel de especialistas da Worldsteel, “ISSF” ao painel de especialistas do *International Stainless Steel Forum*, “IEA” a Agência Internacional de Energia, “IPCC” ao Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, “WRI” ao *World Resource Institute*, “ISO 14404” a norma internacional que estabelece os parâmetros para contabilização de emissões no setor siderúrgico e “EN 19694” a norma europeia que define o cálculo de emissão de gases de efeito estufa.

No Anexo B, estão os fatores de emissão e materiais considerados para os cálculos das emissões de escopo 2 e 3. Os valores relacionados a eletricidade, em roxo, são calculados baseado na média internacional de emissão de CO₂ no consumo de combustíveis, fornecidos pela IEA em 2006. No entanto, é possível inserir os fatores de emissão regionais ou associados a indústria em questão.

No caso da usina estudada neste trabalho, utiliza-se o fator do grid nacional brasileiro, fornecido pelo MCTI por meio do Sistema SIRENE (MCTI, 2025). Para o ano-base de 2024, o valor adotado foi de 54,5 kgCO_{2e}/MWh. Também é possível utilizar fatores específicos por região ou por tipo de indústria, desde que devidamente justificados.

Nos Anexos A e B, os itens em amarelo são modificáveis. Isso ocorre quando se tem o conteúdo de carbono e poder calorífico medidos. Se os dados não forem medidos ou não estiverem disponíveis, os valores padrão são aplicados. Já os itens em azul (fatores de emissão) podem ser alterados indiretamente ao alterar os itens em amarelo. A metodologia incentiva os usuários a utilizarem, sempre que possível, dados locais medidos, visando melhorar a precisão das informações (WSA, 2024).

Dessa forma, quando for medido o conteúdo de carbono, o fator de emissão das emissões diretas pode ser obtido multiplicando-se o conteúdo de carbono (expresso em massa de carbono por massa de insumo, como kg/kg ou t/t) pelo coeficiente 3,664, correspondente a razão entre a massa molar do CO₂ (44,01 g/mol) e a do carbono (12,011 g/mol). Esse procedimento permite estimar, de forma mais precisa, as emissões diretas de CO₂ associadas a queima ou transformação de materiais que contenham carbono.

Embora o padrão do GHG *Protocol* descreva o Escopo 3 como opcional para fins de relatório, a contabilização das emissões a montante do Escopo 3, na metodologia da WSA, assume um papel essencial ao permitir comparações consistentes entre diferentes locais de produção de aço.

4.3 Viabilização da automatização dos dados

O presente tópico tem como objetivo apresentar as etapas adotadas para viabilizar a automatização do inventário de emissões de GEE na unidade operacional analisada nesse estudo. Serão descritos os procedimentos relacionados a padronização e codificação dos dados, ao mapeamento das fontes de informação, a organização das informações no ambiente de *datalake*³, o fluxo de reporte ao corporativo global da empresa e as regras de tratamento aplicadas para garantir a consistência, integridade e compatibilidade dos dados com a metodologia proposta. Essas etapas foram fundamentais para garantir a rastreabilidade das informações e a replicabilidade do processo em outras unidades operacionais da empresa.

³ O *datalake* é uma arquitetura de armazenamento que permite reunir grandes volumes de dados, estruturados ou não estruturados, em seu formato bruto, possibilitando posterior organização, tratamento e análise conforme as necessidades do negócio.

4.3.1 Codificação e padronização dos dados

A viabilização da automatização dos dados teve início com a utilização de uma estrutura de codificação padronizada, previamente estabelecido pela empresa com o objetivo de viabilizar a integração de dados operacionais em nível global. Essa codificação foi estabelecida visando a escalabilidade, permitindo a aplicação em diferentes unidades operacionais da empresa.

A estrutura de codificação abrange elementos como unidade operacional, áreas de processo (como aciaria, alto-forno, laminação e trefilaria), insumos e produtos, além de estabelecer unidades de medida padrão associadas a cada item de consumo e produção. Dessa forma, o recebimento dos dados de forma automatizada pode ser aplicado em diferentes unidades operacionais, mas respeitando uma mesma lógica de codificação.

As codificações estão organizadas em duas listas principais:

- Lista de insumos e produtos, que inclui todos os potenciais itens consumidos ou gerados ao longo dos processos industriais (Anexo C);
- Lista de processos, que compreende os códigos das áreas produtivas onde ocorrem as etapas industriais dentro das unidades operacionais (Anexo D).

A lista de insumos e produtos (Anexo C), contempla diferentes categorias de elementos, cada uma identificada por um prefixo padronizado, conforme apresentado abaixo:

- **Pr-:** Produtos (intermediários ou finais);
- **Cf-:** Combustíveis sólidos e líquidos;
- **Gf-:** Combustíveis gasosos;
- **Ut-:** Utilidades (como eletricidade, vapor, água etc.);
- **Ma-:** Matérias-primas e insumos;
- **Res-:** Resíduos e coprodutos de processo.

Cada item dessa lista representa um possível insumo ou produto relacionado a processos industriais, podendo ser tanto consumido quanto gerado nas diferentes áreas produtivas.

Já a lista de processos (Anexo D), correspondendo as etapas do processo produtivo e as instalações industriais existentes na empresa. Exemplos incluem áreas como Coqueria, Alto-Forno, Aciaria, Laminação, Trefilaria, entre outras. Essa codificação de processos permite relacionar corretamente os consumos e produtos a suas respectivas áreas de processos envolvidas.

Com base nas listas padronizadas de codificação, foi verificado o mapeamento específico dos códigos aplicáveis a unidade operacional foco deste estudo. Essa análise teve como objetivo identificar quais elementos da estrutura de codificação já estavam presentes na planta, bem como eventuais ajustes realizados, como a inclusão, exclusão ou modificação de itens. O mapeamento foi conduzido a partir da avaliação do inventário de emissões de GEE previamente elaborado pela unidade para o ano de 2023, o qual foi auditado por terceira parte com base na metodologia da WSA. Essa análise preliminar permitiu verificar os principais insumos, produtos e áreas de processo relevantes para a unidade, servindo de base para a adequação e consolidação da estrutura de dados necessária a automatização.

4.3.2 Levantamento e mapeamento das origens dos dados

De posse da estrutura de codificação aplicável, iniciou-se a etapa de levantamento e mapeamento das origens dos dados necessários a composição do inventário de GEE. Essa etapa foi conduzida por meio da análise de diversos sistemas corporativos, como o SAP (*Sistemas, Aplicativos e Produtos para Processamento de Dados*) e sistemas internos de gestão da produção e de dados ambientais, com o objetivo de localizar as informações de acordo com os códigos previamente definidos. Embora a empresa já elaborasse inventários de emissões de GEE, tornou-se indispensável, para fins deste trabalho, a realização de uma revisão crítica e a verificação sistemática da origem dos dados utilizados.

O SAP, principal sistema de gestão empresarial (ERP) utilizado pela organização, foi uma das fontes centrais de informação analisadas. Por meio de seus módulos integrados, especialmente os voltados a gestão de materiais e produção, foi possível acessar dados detalhados sobre consumo de insumos, volumes de produção, movimentações internas e

medições operacionais. Além do SAP, foram consultados sistemas internos específicos voltados a gestão ambiental e operacional, desenvolvidos para atender as particularidades da unidade. A utilização integrada desses sistemas contribuiu significativamente para a obtenção de dados primários confiáveis e para a rastreabilidade das informações, aspectos fundamentais para a robustez do processo de automatização do inventário de GEE.

Adicionalmente, foram conduzidas entrevistas semiestruturadas com colaboradores das áreas de sustentabilidade, meio ambiente, controladoria e operação. Essas entrevistas tiveram como finalidade esclarecer dúvidas relativas a origem das informações, aos processos de coleta, medição e reporte dos dados, bem como identificar eventuais lacunas, inconsistências ou práticas informais nos procedimentos adotados (Apêndice A).

Durante a revisão, todas as alterações necessárias foram devidamente registradas, incluindo mudanças na fonte das informações, adequações de unidades de medida, ajustes em fatores de conversão e padronização de nomenclaturas, de forma a garantir a rastreabilidade e a consistência dos dados.

A fim de avaliar a eficiência da revisão e da estruturação dos dados presentes no inventário da unidade operacional em estudo, foi realizada uma comparação entre a quantidade de parâmetros mapeados antes e após a automatização, considerando tanto a diversidade de categorias (insumos, produtos, coprodutos, utilidades e resíduos) quanto a abrangência das origens e destinos associados. Esse comparativo permitiu verificar a ampliação da cobertura do inventário, o aumento da aderência a realidade operacional e a maior conformidade com as diretrizes metodológicas da WSA.

Como resultado desta etapa, foi elaborada uma planilha de controle (Apêndice B), contendo a descrição detalhada de todos os dados brutos utilizados no inventário, a identificação de sua respectiva origem sistêmica e a correspondência com os códigos padronizados. Essa planilha serviu como base fundamental para o processo de integração e automatização dos dados no sistema corporativo.

4.3.3 Integração e organização dos dados no datalake

Com o levantamento de dados concluído, a equipe de tecnologia da informação (TI) foi responsável por integrar as informações em um ambiente de *datalake*, consolidando dados provenientes de múltiplas fontes em um único repositório. Essa centralização permitiu não apenas o armazenamento unificado das informações, mas também sua posterior padronização, facilitando a automatização dos dados.

Para viabilizar essa integração, a empresa adotou um modelo estruturado de consolidação dos dados, baseado em duas planilhas-padrão, previamente definidas com o objetivo de organizar as informações relativas aos fluxos de insumos, produtos e resíduos nas diversas etapas dos processos industriais.

A primeira planilha “Produção e Uso” contempla os principais dados associados a produção e consumo de matérias-primas e outros insumos (Tabela 1).

Tabela 1 - Modelo de recebimento de dados 01 (Produção e Uso)

Unidade Operacional	Processo	Parâmetro	Data de Início	Data Final	Unidade de Medida	Produção	Uso	Tipo de Dado	Tipo de Determinação

Fonte: Adaptado de documento interno (2024).

Na estrutura da planilha, os campos destacados em verde são de preenchimento obrigatório, enquanto os campos em azul requerem o preenchimento de ao menos um dos valores possíveis.

Abaixo, detalha-se a finalidade e as orientações para preenchimento de cada campo:

- **Unidade Operacional:** deve conter o código da unidade operacional, conforme codificação padronizada.
- **Processo:** corresponde ao código do processo em que ocorreu a produção ou o consumo do parâmetro informado, de acordo com a codificação de processos (vide Anexo D).

- **Parâmetro:** refere-se ao código do insumo ou produto em questão, conforme a estrutura definida na planilha de codificação de insumos e produtos (vide Anexo C).
- **Data de Início e Data Final:** indica o período de consolidação do dado reportado. Adotou-se o padrão de consolidação mensal, sendo a data inicial sempre o primeiro dia do mês e a data final o último dia do mesmo mês.
- **Unidade de Medida:** unidade padronizada de registro do dado, conforme associada ao parâmetro na estrutura de codificação (ex.: t, m³, GJ, MWh etc.)
- **Produção e Uso:** representam, respectivamente, os volumes produzidos e os volumes consumidos internamente do parâmetro no período de referência. Pelo menos um desses campos deve ser preenchido.
- **Tipo de Dado:** indica se o dado foi classificado como “provisório” ou “validado”. Para a unidade operacional em estudo, definiu-se internamente que apenas dados validados são encaminhados ao *datalake*.
- **Tipo de Determinação:** especifica a natureza do dado informado, que pode ser medido (diretamente obtido por instrumentação ou sistemas), calculado (derivado de equações ou fatores aplicados sobre outros dados) ou estimado (baseado em médias, inferências ou ausência de dados diretos).

Já a segunda tabela (Tabela 2), detalha características fundamentais para o cálculo de emissões de GEE, sendo uma espécie de complemento da primeira planilha, tais como: conteúdo de carbono (C), poder calorífico inferior (LCV) e *upstream* CO₂. Além disso, também é detalhada a origem e/ou destinação de cada um dos parâmetros.

Tabela 2 - Modelo de recebimento de dados 02 (Geral)

Unidade Operacional	Parâmetros	Data de Início	Data final	C	LCV	Upstream CO2	De Outras Unidades do Grupo	De outras Indústrias	Recuperado de Estoque	Para Outras Unidades do Grupo	Para Outras Atividades	Estoque	Perdas e Lacunas do Inventário	Tipo de Dado	Tipo de Determinação

Fonte: Adaptado de documento interno (2024).

Assim como na planilha anterior, os campos destacados em verde são de preenchimento obrigatório, enquanto os campos em azul devem ser preenchidos obrigatoriamente pelo menos um deles. Já os campos em amarelo devem ser preenchidos sempre que aplicável.

Os campos da segunda planilha estão organizados conforme as seguintes diretrizes:

- **Unidade Operacional:** assim como na primeira planilha, deve conter o código da unidade operacional, conforme codificação padronizada.
- **Parâmetros:** assim como na primeira planilha, refere-se ao código do insumo ou produto em questão, conforme a estrutura definida na planilha de codificação de insumos e produtos (vide Anexo C).
- **Data de Início e Data Final:** assim como na primeira planilha, indica o período de consolidação do dado reportado. Adotou-se o padrão de consolidação mensal, sendo a data inicial sempre o primeiro dia do mês e a data final o último dia do mesmo mês.
- **C (Conteúdo de carbono):** conteúdo de carbono do insumo, expresso em base seca (% massa/massa).
- **LCV (*Low Calorific Value*):** valor calórico inferior do material, também expresso em base seca, essencial para o cálculo de emissões de GEE associadas a queima de combustíveis.
- **Upstream CO₂:** valor estimado de emissões indiretas de GEE associadas a produção e transporte do insumo até a unidade (em kg CO₂ por unidade).

Os campos azuis na segunda planilha representam as possíveis fontes ou destinos dos fluxos reportados:

- **De Outras Unidades do Grupo:** volume recebido de outras unidades industriais do mesmo grupo empresarial.
- **De Outras Indústrias:** quantidade proveniente de fornecedores externos.
- **Recuperado de Estoque:** insumos reaproveitados de estoques internos.
- **Para Outras Unidades do Grupo:** fluxos enviados a outras unidades industriais do grupo.
- **Para Outras Atividades:** materiais utilizados em setores não diretamente ligados a produção, como manutenção ou pesquisa.
- **Estoque:** volume armazenado internamente no período de referência.
- **Perdas e Lacunas do Inventário:** discrepâncias identificadas entre volumes esperados e efetivamente registrados.

- **Tipo de Dado:** indica se o dado foi classificado como “provisório” ou “validado”. Para a unidade operacional em estudo, definiu-se internamente que apenas dados validados são encaminhados ao *datalake*.
- **Tipo de Determinação:** especifica a natureza do dado informado, que pode ser medido (diretamente obtido por instrumentação ou sistemas), calculado (derivado de equações ou fatores aplicados sobre outros dados) ou estimado (baseado em médias, inferências ou ausência de dados diretos).

Essas planilhas funcionam como modelo de entrada estruturado no *datalake*, sendo automaticamente preenchidas a partir das integrações com sistemas e outros bancos internos de dados da empresa. Dessa forma, os dados são organizados de forma consistente, seguindo a lógica de codificação padronizada adotada pela empresa.

4.3.4 Regras de tratamento e padronização

Com o objetivo de garantir a compatibilidade dos dados extraídos do *datalake* com o modelo de reporte estabelecido, foi necessário definir um conjunto de regras específicas de tratamento e padronização. Essas regras contemplam a conversão de unidades de medida, o uso de fatores de conversão e cálculos sobre os dados brutos para viabilizar a consolidação adequada das informações.

A aplicação dessas regras garantiu que os dados estivessem corretamente estruturados e vinculados as codificações padronizadas, sendo essencial para assegurar que as informações consolidadas no *datalake* estejam prontas para validação e posterior transmissão ao sistema corporativo global da empresa.

4.3.5 Governança e validação interna dos dados

A última etapa do processo de automatização envolveu o estabelecimento da governança dos dados e a validação formal das informações consolidadas no *datalake*. Para isso, foi desenvolvido um painel interativo em *Power BI*, conectado diretamente ao *datalake*, no qual os dados operacionais são organizados conforme o modelo das planilhas-padrão e apresentados de forma clara e estruturada.

A validação dos dados é realizada por meio de uma interface no *Power Apps*, integrada ao *Power BI*, na qual o profissional responsável pela unidade operacional analisa os dados e formaliza sua aprovação. Essa validação é registrada com data e identificação do responsável.

Após a validação interna, a equipe de TI é responsável por executar o envio dos dados ao sistema corporativo global da empresa. Como parte das diretrizes de governança estabelecidas, ficou definido que o inventário de GEE deve ser validado e reportado até o dia 20 do mês subsequente ao mês de referência, assegurando um ciclo de reporte regular e previsível.

4.4 Avaliação da eficiência da implantação da automatização

A avaliação da eficiência da implantação da ferramenta de automatização do inventário de GEE na unidade operacional estudada foi conduzida a partir de duas abordagens complementares: a elaboração paralela de um inventário utilizando a metodologia manual anterior (com base em planilhas do Microsoft Excel®) e a realização de uma auditoria externa conduzida por terceira parte especializada.

Na primeira abordagem, foi desenvolvido um inventário manual para o ano-base de 2024, replicando integralmente os procedimentos anteriormente utilizados na unidade operacional em estudo. O processo envolveu a busca direta e individualizada de dados nos sistemas operacionais e de gestão, sua extração manual e a posterior organização das informações nas planilhas estruturadas para fins de consolidação e cálculo das emissões.

Esse modelo manual seguiu rigorosamente os mesmos critérios aplicados no sistema automatizado, assegurando equivalência de estrutura, parâmetros e fórmulas para permitir uma comparação direta entre os dois cenários. A finalidade principal desta abordagem foi atuar como um instrumento de verificação cruzada (*double-check*), conferindo se os dados extraídos automaticamente estavam sendo corretamente integrados e estruturados na base corporativa mundial da empresa.

Cabe destacar que, no modelo manual adotado anteriormente pela unidade operacional, o inventário de GEE era realizado apenas a cada três meses, devido a elevada carga de trabalho envolvida no processo de coleta, tratamento e consolidação dos dados. Essa limitação

operacional restringia a frequência de atualização e dificultava o acompanhamento contínuo das emissões. Com a automação, o processo de inventário poderá ser executado mensalmente, ampliando significativamente a capacidade de gestão das emissões.

A segunda abordagem consiste em uma auditoria externa independente, realizada por uma organização especializada na verificação de inventários corporativos de GEE. A auditoria teve como objetivo avaliar a conformidade metodológica do inventário com as diretrizes da WSA, considerando os princípios de relevância, integralidade, consistência, transparência e exatidão.

Embora a auditoria tenha sido baseada na versão manual do inventário, elaborada paralelamente como ferramenta de verificação, seus resultados foram utilizados para atestar a confiabilidade do sistema automatizado, uma vez que ambas as versões seguiram os mesmos fundamentos técnicos. Dessa forma, a validação da planilha manual funcionou como evidência da fidelidade do inventário gerado automaticamente.

4.5 Visualização e análise das emissões

Ainda para a viabilização da automatização da coleta e estruturação dos dados, foi desenvolvido um painel dinâmico de visualização por meio da ferramenta *Power BI*, com o objetivo de facilitar a análise, o monitoramento e a interpretação dos resultados do inventário de GEE.

O painel foi projetado para receber diretamente os dados consolidados no *data lake*, onde são tratados com base nas regras de cálculo definidas pela metodologia da WSA. Dessa forma, os fatores de emissão, fórmulas e coeficientes estabelecidos pela WSA foram implementados diretamente na modelagem de dados dentro do ambiente do *Power BI*, permitindo o cálculo automatizado das emissões de GEE.

Dessa forma, foi possível a realização dos cálculos sem a necessidade de etapas intermediárias externas, garantindo maior consistência metodológica, rastreabilidade dos dados e atualização a medida que novas informações são carregadas no sistema. A estrutura no *Power BI* foi cuidadosamente construída para refletir as particularidades da metodologia,

considerando os tipos de fontes emissoras, categorias de escopo (1, 2 e 3) e os tipos de insumos e produtos.

4.6 Redução de tempo associada ao estudo

A avaliação do ganho de eficiência em termos de tempo, decorrente da automatização do inventário de GEE na unidade operacional em estudo, foi realizada com base em estimativas técnicas validadas internamente, considerando a experiência acumulada da equipe responsável pela elaboração do inventário ao longo dos últimos ciclos anuais, especialmente o ano anterior (2023) e o ano-base de 2024.

Essa análise não se baseou em medições cronometradas, mas sim em uma avaliação técnica, levando em conta as horas historicamente demandadas para execução das etapas do inventário no modelo manual e projetando o esforço necessário caso o processo fosse realizado com frequência mensal, como agora é possível no modelo automatizado.

Para isso, foram consideradas todas as etapas envolvidas no processo manual como a extração individual de dados em diferentes sistemas, a verificação e conversão de unidades de medida, o preenchimento em planilha do Microsoft Excel®, e validação e consolidação final dos resultados.

Essas estimativas foram discutidas e validadas internamente por profissionais que participaram da execução dos inventários anteriores, assegurando representatividade e realismo na comparação entre os dois modelos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Revisão de inventários anteriores e volume de dados levantados

Neste tópico, são apresentados os resultados da revisão dos inventários de GEE elaborados anteriormente pela unidade operacional em estudo, com destaque para o volume de dados disponíveis, a manutenção da configuração dos processos produtivos e a atualização da lista de parâmetros aplicáveis. A análise permitiu identificar a inclusão de novos insumos e a necessidade de ajustes nas informações, ampliando a cobertura e a precisão do inventário.

5.1.1 Processos e parâmetros aplicáveis a unidade operacional

A partir da revisão realizada nos inventários anteriores e nos sistemas de origem de informações da unidade operacional em estudo, não foi identificadas alterações nos processos produtivos, uma vez que não houve modificações estruturais ou tecnológicas que impactassem o fluxo produtivo. A Tabela 3 apresenta os processos atualmente existentes na unidade, acompanhados de seus respectivos códigos, conforme estabelecido no Anexo D.

Tabela 3 – Processos operacionais existentes na unidade operacional

Código	Área de Processo
13	Alto-Forno
22	Aciaria Elétrica
23	Metalurgia Secundária
25	Lingotamento Contínuo
36	Laminador de Barras
38	Laminador de Fio Máquina
87	Trefilação de Arame
94	Planta de Ar Comprimido
98	Outros
99	Flares

Fonte: Autora (2025).

Em relação aos parâmetros aplicáveis (compreendendo matérias-primas, produtos, coprodutos, resíduos, combustíveis e utilidades), em uma primeira versão não foram identificadas atualizações importantes em comparação aos inventários de GEE anteriores.

Porém, após a realização da auditoria por terceira parte, que teve como objetivo avaliar a conformidade metodológica do inventário com as diretrizes da WSA, foram incluídos dois novos parâmetros que não constavam nas versões anteriores: Ma-62 (outras ligas de ferro) e Ma-63 (outros materiais minerais).

A Tabela 4 apresenta o consolidado (pós auditoria) dos 44 parâmetros atualmente aplicáveis, classificados por categoria: 7 combustíveis condensados, 2 gases combustíveis, 17 matérias-primas, 10 produtos, 3 resíduos e 5 utilidades empregadas nos processos industriais.

Tabela 4 – Codificação dos Parâmetros (Insumos e Produtos) aplicáveis a unidade operacional

Parâmetro	Descrição	Categoria
CF-07	Carvão para Forno Elétrico a Arco	Combustível Condensado
CF-08	Coque de Petróleo	Combustível Condensado
CF-11	Óleo Diesel	Combustível Condensado
CF-12	GLP	Combustível Condensado
CF-13a	Carvão Orgânico Interno	Combustível Condensado
CF-13b	Carvão Orgânico Externo	Combustível Condensado
CF-13c	Finos de Carvão	Combustível Condensado
GF-02	Gás de Alto-Forno	Gás Combustível
GF-05	Gás Natural	Gás Combustível
Ma-01	Eletrodos	Matéria-Prima
Ma-03	Ferro Cromo	Matéria-Prima
Ma-04	Ferro Manganês	Matéria-Prima
Ma-07	Sucata Coletada	Matéria-Prima
Ma-08	Calcário	Matéria-Prima
Ma-09	Cal	Matéria-Prima
Ma-10	Dolomita Bruta	Matéria-Prima
Ma-11	Dolomita Calcinada	Matéria-Prima
Ma-13	Minério Fixo	Matéria-Prima
Ma-14	Pelotas	Matéria-Prima
Ma-27	Ferro Nobium	Matéria-Prima
Ma-31	Ferro Sílico	Matéria-Prima
Ma-33	Sílico Manganês	Matéria-Prima

Parâmetro	Descrição	Categoria
Ma-47	Ferro Vanádio	Matéria-Prima
Ma-53	Alumínio	Matéria-Prima
Ma-62	Outras ligas de ferro	Matéria-Prima
Ma-63	Outros materias minerais	Matéria-Prima
Pr-01	Sínter	Produto
Pr-02	Gusa de Alto-Forno	Produto
Pr-02a	Ferro-gusa de Bio Carvão	Produto
Pr-02b	Ferro-gusa de Não Bio Carvão	Produto
Pr-06	Aço Líquido de FEA	Produto
Pr-07	Aço Líquido para Lingotamento	Produto
Pr-09	Aço Bruto de Lingotamento Contínuo	Produto
Pr-14	Barras	Produto
Pr-16	Fio Máquina	Produto
Pr-32	Trefilados	Produto
Res-06	Pó de Limpeza de Gás de Alto-Forno	Resíduo
Res-08	Escória de Alto-Forno Granulada	Resíduo
Res-13	Sucata Metálica Interna	Resíduo
Ut-01	Eletricidade	Utilidade
Ut-05	Oxigênio	Utilidade
Ut-07	Nitrogênio	Utilidade
Ut-08	Argônio	Utilidade
Ut-09	Ar-Comprimido	Utilidade

Fonte: Autora (2025).

Ressalta-se, contudo, que essa identificação está sujeita a novas revisões e atualizações, especialmente diante da evolução dos processos produtivos, da adoção de novas tecnologias ou da melhoria dos sistemas de coleta e gestão de dados operacionais.

5.1.2 Atualizações no mapeamento de entradas e saídas

Durante a etapa de revisão e consolidação das informações, também foram realizadas atualizações relevantes no mapeamento de entrada e saída dos parâmetros aplicáveis a unidade operacional em estudo. As alterações abrangeram tanto as origens dos materiais,

como insumos oriundos de outras indústrias, de unidades do próprio grupo empresarial, volumes recuperados de estoque e materiais gerados internamente quanto suas destinações, como o envio para outras unidades do grupo, para outras indústrias, para o estoque ou para uso interno nos processos da planta.

Essas modificações foram resultado de uma análise detalhada dos inventários anteriores e das fontes de informação, com o objetivo de aprimorar a rastreabilidade e a exatidão e a dos dados utilizados no cálculo das emissões de GEE.

Ao todo, foram registradas 26 alterações no mapeamento de dados, sendo 9 novas informações acrescentadas, 16 ajustes e 1 exclusão, conforme demonstrado na Tabela 05.

Importante destacar que alguns ajustes necessários haviam passado despercebidos nas etapas internas de revisão, sendo identificados apenas durante a auditoria externa, evidenciando o papel essencial dessa verificação por terceira parte na construção da confiabilidade do inventário. As adequações identificadas durante a auditoria foram sinalizadas com um asterisco (*).

Tabela 05 – Consolidado final das alterações mapeadas para o inventário.

Parâmetro	Fonte/Destino	Tipo de modificação	Observação
Pr-01	De Outras Indústrias	Acrescentado	Não estava sendo mapeado no inventário a origem do Pr-01 de Outras Indústrias. Era todo considerado como sendo de Outras Unidades do Grupo.
Pr-02	De Outras Indústrias	Alterado	Pr-02 estava sendo mapeado como de outras unidades do grupo, mas foi verificado que é de outras indústrias.
Pr-02	De Outras Unidades do Grupo	Retirado	Pr-02 estava sendo mapeado como de outras unidades do grupo mas foi verificado que é de outras indústrias.
Pr-02a	De Outras Unidades do Grupo	Acrescentado	Não estava sendo mapeado no inventário a origem do Pr-01 de Outras Unidades do Grupo. Era todo considerado como sendo de Outras Indústrias.

Parâmetro	Fonte/Destino	Tipo de modificação	Observação
Pr-09	Uso	Alterado	Antes o consumo era dividido errado entre os dois diferentes tipos de Laminadores da unidade. Com a revisão foi ajustada o Uso em cada Laminador.
Pr-09	Para Outras Unidades do Grupo	Acrescentado	Não estava sendo mapeado.
Pr-09	Para Outras Unidades do Grupo	Acrescentado	Não estava sendo mapeado.
Pr-14	Produção	Alterado	Alterada fonte da informação. Antes a maior parte da produção do Pr-14 era considerada como Pr-16.
Pr-14	Para Outras indústrias	Alterado	Alterada fonte da Informação. Antes a maior parte do Para Outras Indústrias do Pr-14 era considerada como do Pr-16.
Pr-16	Produção	Alterado	Alterada fonte da Informação. Antes a maior parte do Para Outras Indústrias do Pr-14 era considerada como do Pr-16.
Pr-16	Para Outras Unidades do Grupo	Acrescentado	Estava sendo considerado apenas para Outras Indústrias.
Ma-01	Uso	Alterado	Use estava sendo considerado todo no Shop 22. Foi feita a alteração para considerar o uso de diferentes processos.
Ma-07	Uso	Alterado	Alterado de Ma-06 para Ma-07 (mais adequado conceitualmente).
Ma-07	De Outras Indústrias	Alterado	Alterado de Ma-06 para Ma-07 (mais adequado conceitualmente).
Ma-08	Uso	Alterado	Ma-08 e Ma-10 estavam sendo considerados trocados no inventário antigo. Foi invertida entre o Ma-08 e Ma-10 a rastreabilidade.
Ma-08	De Outras Indústrias	Alterado	Ma-08 e Ma-10 estavam sendo considerados trocados no inventário antigo. Foi invertida entre o Ma-08 e Ma-10 a rastreabilidade.
Ma-10	Uso	Alterado	Ma-08 e Ma-10 estavam sendo considerados trocados no inventário antigo. Foi invertida entre o Ma-08 e Ma-10 a rastreabilidade.
Ma-10	De Outras Indústrias	Alterado	Ma-08 e Ma-10 estavam sendo considerados trocados no inventário antigo. Foi invertida entre o Ma-08 e Ma-10 a rastreabilidade.
Ma-13*	Uso	Alterado	Ma-13 e Ma-14 estavam sendo considerados trocados no inventário antigo. Foi invertida entre o Ma-13 e Ma-14 a rastreabilidade.

Parâmetro	Fonte/Destino	Tipo de modificação	Observação
Ma-13*	De Outras Indústrias	Alterado	Ma-13 e Ma-14 estavam sendo considerados trocados no inventário antigo. Foi invertida entre o Ma-13 e Ma-14 a rastreabilidade.
Ma-14*	Uso	Alterado	Ma-13 e Ma-14 estavam sendo considerados trocados no inventário antigo. Foi invertida entre o Ma-13 e Ma-14 a rastreabilidade.
Ma-14*	De Outras Indústrias	Alterado	Ma-13 e Ma-14 estavam sendo considerados trocados no inventário antigo. Foi invertida entre o Ma-13 e Ma-14 a rastreabilidade.
Ma-62*	Uso	Acrescentado	Acrescentado novo agrupamento de materiais identificado.
Ma-62*	De Outras Indústrias	Acrescentado	Acrescentado origem de novo agrupamento de materiais identificado.
Ma-63*	Uso	Acrescentado	Acrescentado novo agrupamento de materiais identificado.
Ma-63*	De Outras Indústrias	Acrescentado	Acrescentado origem de novo agrupamento de materiais identificado.

Fonte: Autora (2025).

Além da inclusão dos parâmetros Ma-62 (outras ligas de ferro) e Ma-63 (outros materiais minerais) no inventário de GEE (recomendação decorrente da auditoria externa por terceira parte), também foi identificada, durante esse processo de verificação, a necessidade de correção na origem das informações referentes aos parâmetros Ma-13 (minério fixo) e Ma-14 (pelotas). A auditoria apontou que os dados estavam sendo mapeados com origens invertidas, o que comprometia a representação adequada dos fluxos de entrada desses insumos nos processos produtivos.

Após análise detalhada dos inventários elaborados em anos anteriores, verificou-se que essa inversão na origem das informações já vinha sendo reproduzida historicamente, inclusive em ciclos de inventário que haviam passado por auditorias anteriores sem a devida identificação do problema.

As atualizações necessárias e as inconsistências identificadas, reforçam a importância da revisão crítica contínua dos parâmetros e dos fluxos mesmo em processos já consolidados, e

reforçou o valor das auditorias por terceira parte como instrumento de asseguuração das informações, contribuindo para a confiabilidade dos dados.

5.1.3 Estruturação da base de dados

Ao todo, após as revisões aplicáveis identificadas antes e após a auditoria por terceira parte, foram identificados e mapeados um total de 374 dados de origens ou destinos relacionados aos 44 parâmetros presentes na unidade operacional em estudo que passaram a compor a base de dados automatizada integrada ao *datalake* (Tabela 06). Esses dados representam os insumos, produtos e coprodutos relacionados aos processos industriais da planta, considerando diferentes origens, usos e destinos de materiais.

Tabela 06 – Volume de dados e origens mapeados

Categoria de Dados	Quantidade de Dados Mapeados
Conteúdo de Carbono (C)	44
Poder Calorífico Inferior (LCV)	44
UpStream CO ₂	44
Produção	12
Uso Interno	113
Origem: Outras Unidades do Grupo	8
Origem: Outras Indústrias	89
Origem: Recuperado de Estoque	4
Destino: Outras Unidades do Grupo	2
Destino: Outras Atividades	7
Destino: Estoque	4
Perdas e Lacunas	4

Fonte: Autora (2025).

A base de dados foi estruturada com base na metodologia da WSA, contemplando ainda variáveis essenciais como conteúdo de carbono (C), poder calorífico inferior (LCV) e

emissões indiretas associadas a cadeia de suprimentos (*Upstream CO₂*). Foram contabilizados 44 parâmetros principais, cada um vinculado aos seus respectivos atributos complementares: 44 valores de C, 44 valores de LCV e 44 fatores de upstream CO₂.

Além desses, a consolidação considerou 12 dados de produção (*output* da unidade operacional) e 113 dados de uso interno (consumo de insumos nos processos produtivos). Os fluxos de entrada externos também foram devidamente mapeados: 8 dados de outras unidades do grupo empresarial, 89 dados de fornecedores externos (outras indústrias) e 4 dados com volumes recuperados de estoque interno.

No que tange aos destinos dos materiais, foram identificados 2 dados de envio para outras unidades do grupo, 7 para outras indústrias, além de 4 para armazenamento em estoque. Por fim, foram registrados 4 dados relacionadas a perdas de processo e lacunas de inventário.

5.1.4 Rastreabilidade das informações e regras de padronização

No que se refere a confiabilidade dos dados incorporados a base automatizada do inventário de GEE da unidade operacional em estudo, as informações foram obtidas por meio de três abordagens distintas, conforme o nível de integração com os sistemas corporativos e o tratamento necessário para adequação ao modelo padronizado:

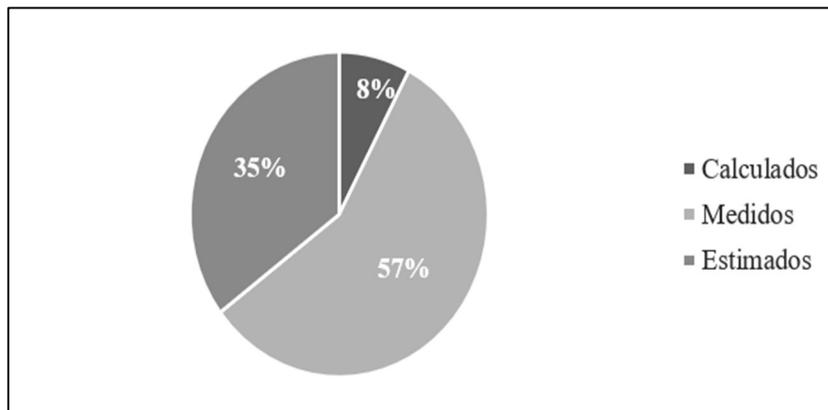
- Dados extraídos diretamente de sistemas operacionais e de gestão, sem necessidade de conversão de unidade de medida, por estarem compatíveis com o formato da planilha-padrão (Tabelas 1 e 2);
- Dados extraídos diretamente dos mesmos sistemas, com necessidade de conversão de unidade de medida para adequação ao modelo de consolidação;
- Dados calculados a partir de um ou mais insumos diretos provenientes dos sistemas operacionais e de gestão.

Ao todo, foram utilizados 374 dados na composição do inventário da unidade operacional em estudo. Desses, 213 dados foram importados diretamente dos sistemas, em conformidade com as unidades de medida exigidas; 132 dados também foram extraídos diretamente, mas demandaram conversão de unidade de medida; e 29 dados foram obtidos por meio de cálculos com base em um ou mais parâmetros provenientes dos sistemas.

Para fins de preenchimento do campo “Tipo de Determinação”, obrigatório nas planilhas-padrão, os dados que precisaram apenas da conversão de unidade de medida foram classificados como “Medidos”, por manterem sua origem em registros reais dos sistemas. Já os parâmetros referentes ao conteúdo de carbono, LCV e *Upstream CO₂* foram considerados “Estimados”, uma vez que foram adotados com base nos fatores *default* corporativos estabelecidos para todas as unidades industriais da multinacional.

A classificação dos dados utilizados no inventário, conforme o tipo de determinação, foi composta por 57% de dados medidos, 35% estimados e apenas 8% calculados. Ainda que exista uma parcela considerável de dados estimados, o inventário apresenta elevado grau de confiabilidade, uma vez que essas estimativas se referem, em sua maioria, a fatores de emissão reconhecidos e metodologicamente aceitos.

Figura 05 – Forma de determinação dos dados.



Fonte: Autora (2025).

5.1.5 Governança e validação interna

A governança eficaz da informação é um dos pilares fundamentais para a confiabilidade e a rastreabilidade dos dados corporativos, especialmente em processos críticos como o reporte de inventários de emissões de GEE. Segundo Rêgo (2023), a gestão de dados exige a definição clara de papéis e responsabilidades, bem como a implementação de fluxos estruturados de controle, garantindo integridade, conformidade e qualidade das informações. Alinhado a esse princípio, a implementação de um painel de gestão em *Power BI*, integrado

ao *Power Apps*, desempenhou papel estratégico como instrumento de validação técnica e apoio a governança dos dados.

A estrutura desenvolvida permitiu a equipe da unidade operacional em estudo visualizar, de forma clara e padronizada, os dados consolidados no *datalake*, viabilizando a análise prévia antes do envio ao sistema corporativo global da empresa.

Nesse sentido, a estrutura proposta, ao atender aos requisitos mínimos de validação formal e padronização, representou um avanço substancial em relação ao processo anterior baseado em planilhas manuais, fortalecendo a governança ambiental e a qualidade das informações disponibilizadas a gestão corporativa.

Até o momento, o processo ainda se encontra em fase de implementação, com validação e reporte realizados apenas para os dados consolidados do ano de 2024. A validação dos dados de janeiro de 2024, por exemplo, foi concluída e registrada em 20 de fevereiro de 2025, conforme mostra o “Painel de Validação” da Figura 06. O sistema registra automaticamente a data e hora da validação, além do nome do responsável (o qual foi ocultado na imagem, assim como os valores numéricos dos parâmetros, por razões de confidencialidade). Para os dados referentes a planilha-padrão “Geral” é seguida a mesma lógica.

Figura 06 - Painel de Validação “Production/Use”

SITE	BEGINDATE	ENDDATE	UNIT	TOOL	STREAMCODE	SHOP	PRODUCTION	USE	DATATYPE	DETERMIN
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	10 ⁶ Nm ³	13-00	Uh-09	13			Validated	Estimated
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	10 ⁶ Nm ³	22-00	Uh-09	22			Validated	Estimated
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	10 ⁶ Nm ³	38-00	Uh-09	38			Validated	Estimated
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	10 ⁶ Nm ³	87-00	Uh-09	87			Validated	Estimated
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	10 ⁶ Nm ³	94-00	Uh-09	94			Validated	Estimated
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	10 ⁶ Nm ³	98-00	Uh-09	98			Validated	Estimated
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	103.m3N	13-00	Uh-05	13			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	103.m3N	22-00	Uh-05	22			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	103.m3N	22-00	Uh-07	22			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	103.m3N	23-00	Uh-08	23			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	103.m3N	25-00	Uh-05	25			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	103.m3N	25-00	Uh-07	25			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	103.m3N	38-00	Uh-07	38			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	103.m3N	87-00	Uh-07	87			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	GJ	13-00	GF-02	13	1		Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	GJ	22-00	GF-05	22			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	GJ	25-00	GF-05	25			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	GJ	36-00	GF-02	36			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	GJ	36-00	GF-05	36			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	GJ	38-00	GF-02	38			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	GJ	38-00	GF-05	38			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	GJ	87-00	CF-12	87			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	GJ	87-00	GF-05	87			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	GJ	98-00	CF-12	98			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	GJ	98-00	GF-05	98			Validated	Measured
AMB1_JUIZ_1	2024-01-01T00:00:00.000Z	2024-01-31T00:00:00.000Z	GJ	99-00	GF-02	99			Validated	Measured

Fonte: *Power BI* Interno (2025).

A validação é operacionalizada via *Power Apps* e segue o fluxo de governança que determina que os dados de cada mês devem ser validados até o dia 20 do mês subsequente. Após essa validação formal, a equipe de TI é responsável por realizar o envio dos dados ao sistema global.

No entanto, identificou-se uma oportunidade de aprimoramento no formato de apresentação das informações. A validação direta sobre os dados brutos, embora tecnicamente válida, pode não ser o formato mais adequado para assegurar uma análise crítica e estratégica das informações consolidadas. A visualização baseada apenas nas planilhas-padrão “Produção e Uso” e “Geral”, não fornece alertas visuais de variações significativas entre períodos. Esse formato exige do responsável técnico um conhecimento aprofundado sobre os fluxos da unidade operacional para identificar inconsistências, o que pode limitar a eficácia da validação em contextos com maior complexidade operacional.

Diante dessa limitação, foi reconhecida a necessidade de uma solução complementar mais orientada a análise de emissões e ao monitoramento de variações temporais, o que levou ao desenvolvimento de um segundo painel, também em *Power BI*, com foco na visualização gráfica e analítica das emissões. Esse novo painel contempla indicadores como emissões totais por escopo, evolução temporal, variações por processo e alertas automáticos de desvios relevantes, tornando-se uma ferramenta mais adequada para anteceder a validação final dos dados brutos.

Esse segundo painel foi concebido para ser utilizado como etapa anterior a validação final via *Power Apps*, ampliando o grau de confiabilidade e controle do processo. Sua estrutura e funcionalidades serão detalhadas no item 5.3, onde será apresentada sua aplicação prática e seu papel como instrumento de apoio a tomada de decisão e a melhoria contínua na gestão das emissões da unidade operacional.

5.2 Eficiência e validação da automatização de dados

Este tópico apresenta a avaliação da eficiência e confiabilidade da ferramenta de automatização do inventário de GEE implementada na unidade operacional em estudo. A análise abrange dois focos complementares: o comparativo entre os inventários elaborados

de forma manual e automatizada, e a verificação por auditoria externa conduzida por terceira parte. O objetivo é verificar a consistência dos dados enviados ao sistema corporativo global da empresa, identificar eventuais inconsistências e avaliar a aderência metodológica da solução desenvolvida.

5.2.1 Comparativo entre o inventário manual e inventário automatizado

A partir do comparativo realizado entre o inventário elaborado de forma manual (utilizando planilhas do Microsoft Excel®) e o inventário gerado de maneira automatizada, com base nos dados extraídos após o envio ao sistema corporativo global da empresa, foi avaliada a eficiência e a confiabilidade da ferramenta de automatização do inventário. Ambos os inventários foram elaborados com o mesmo escopo, parâmetros e estrutura metodológica, assegurando a comparabilidade entre os resultados.

A análise demonstrou concordância nos parâmetros utilizados em ambas as versões. Apesar da forte equivalência entre os inventários, o comparativo também permitiu identificar duas inconsistências pontuais no envio automatizado dos dados: duplicação de linhas na planilha-padrão “Produção e Uso” e a presença de linhas em branco na planilha-padrão “Geral”.

Essas falhas evidenciam a necessidade de ajustes operacionais na etapa final de integração entre o *datalake* e o sistema de recebimento do corporativo global da empresa, uma vez que os dados estavam corretamente estruturados na origem, conforme verificado durante o processo de validação dos dados.

Em relação às emissões absolutas, ao comparar os resultados por escopo entre o inventário elaborado de forma manual (utilizando planilhas no Microsoft Excel®) e aquele gerado de maneira automatizada, observa-se uma boa convergência entre os valores, com pequenas variações justificáveis por ajustes ainda necessários ao sistema automatizado (Tabela 07).

Tabela 07 – Comparativo (Inventário Manual x Automatizado: Emissões Absolutas por Escopo)

Escopo	Emissões Absolutas (tCO ₂) - Método Antigo (Planilhas do Microsoft Excel®)	Emissões Absolutas (tCO ₂) - Automatizado
1	89.062,00	86.775,00
2	28.149,00	23.758,00
3	578.825,00	576.673,00

Fonte: Autora (2025).

Nos Escopos 1 e 3, a diferença identificada está relacionada à ausência da automatização dos parâmetros Ma-62 e Ma-63, que representam fontes de emissão ainda não integradas ao sistema automatizado. Já no Escopo 2, a divergência se deve principalmente à necessidade de adequação de fatores de emissão atualizados para energia elétrica, o que impactou diretamente os resultados ao longo do período analisado. Tais comparações reforçam a importância de ajustes contínuos na parametrização da ferramenta automatizada, garantindo a confiabilidade dos dados reportados e sua coerência com os métodos previamente adotados.

Apesar das correções ainda pendentes, os resultados obtidos até o momento indicam que a ferramenta automatizada apresenta elevada robustez técnica, aderência metodológica e segurança operacional, proporcionando ganhos expressivos em termos de agilidade, padronização e rastreabilidade quando comparada ao modelo manual anteriormente utilizado pela unidade operacional.

5.2.2 Auditoria por terceira parte

A segunda abordagem avaliativa foi a realização de uma auditoria por terceira parte, conduzida por uma organização especializada em verificação de inventários de GEE. Embora a auditoria tenha sido aplicada a versão manual do inventário de 2024, os critérios técnicos e os dados utilizados eram equivalentes aos do modelo automatizado, permitindo que os resultados da auditoria fossem utilizados como evidência de validação indireta da solução automatizada.

O relatório de verificação não identificou não conformidades críticas e atestou a conformidade do inventário com os princípios metodológicos estabelecidos pela WSA,

incluindo relevância, integralidade, consistência, transparência e exatidão. Entre as recomendações emitidas, destacam-se: a inclusão dos parâmetros Ma-62 (outras ligas de ferro) e Ma-63 (outros materiais minerais), ausentes nas versões anteriores do inventário; e a correção na origem de informação dos parâmetros Ma-13 e Ma-14, que vinham sendo invertidos historicamente tanto na versão manual quanto na automatizada.

Esses apontamentos reforçam a importância da revisão contínua do inventário e da atuação de terceira parte como instrumento de asseguarção da qualidade e da confiabilidade dos dados reportados.

5.3 Visualização e análise das emissões

Considerando que a automatização estruturada tem como foco o reporte dos dados brutos ao sistema corporativo global da empresa, sem contemplar diretamente o cálculo final das emissões, tornou-se necessária a criação de uma solução complementar voltada aos usuários locais. Com esse objetivo, foi desenvolvido um segundo painel interativo no *Power BI*, destinado a visualização, cálculo e análise das emissões de CO₂ geradas a partir dos dados consolidados no *datalake*.

Essa ferramenta adicional permitiu transformar os dados brutos reportados automaticamente em informações úteis para gestão das emissões de CO₂ na unidade operacional, viabilizando o cálculo das emissões por Escopos, processos e parâmetros. Atende, assim, as necessidades internas da empresa de suporte a tomada de decisão, ampliando a utilidade prática do inventário. O painel foi dividido em duas telas principais:

A primeira tela (Figura 07) apresenta uma visão resumida com parte dos dados brutos automatizados, incluindo os códigos dos parâmetros e processos associados, as emissões calculadas por Escopo (1, 2 e 3) e os valores de emissão específica por processo. Essa visualização oferece uma leitura mais detalhada e individualizada dos dados, permitindo a análise direta das emissões absolutas e específicas por parâmetro.

Figura 07 – Tela para visualização das emissões absolutas e específicas por parâmetro

Emissão CO2												
Ano		Site		Stream Code		chop_code						
2024		AMB1_JUIZ_1		Todos		Todos						
Unidade Operacional	Código Parâmetro	Nome Parâmetro	Cód. Processo	Unidade de Medida	Produção	Uso	Emissão absoluta Escopo 1	Emissão absoluta Escopo 2	Emissão absoluta Escopo 3	Emissão Específica por processo do produto - Escopo 1	Emissão Específica por processo do produto - Escopo 2	Emissão Específica por processo do produto - Escopo 3
AMB1_JUIZ_1	Pn-02a	Pn-02a Bio charcoal pig iron	13	ton								
AMB1_JUIZ_1	Ut-09	Ut-09 Compressed air	94	103m ³ N								
AMB1_JUIZ_1	Ut-01	Ut-01 Electricity	13	MWh								
AMB1_JUIZ_1	Ut-01	Ut-01 Electricity	22	MWh								
AMB1_JUIZ_1	Ut-01	Ut-01 Electricity	23	MWh								
AMB1_JUIZ_1	Ut-01	Ut-01 Electricity	25	MWh								
AMB1_JUIZ_1	Ut-01	Ut-01 Electricity	36	MWh								
AMB1_JUIZ_1	Ut-01	Ut-01 Electricity	38	MWh								
AMB1_JUIZ_1	Ut-01	Ut-01 Electricity	87	MWh								
AMB1_JUIZ_1	Ut-01	Ut-01 Electricity	98	MWh								
AMB1_JUIZ_1	CF-07	CF-07 SAF coal	22	ton								
AMB1_JUIZ_1	GF-02	GF-02 Blast furnace gas	13	GJ								
AMB1_JUIZ_1	GF-02	GF-02 Blast furnace gas	36	GJ								
AMB1_JUIZ_1	GF-02	GF-02 Blast furnace gas	38	GJ								
AMB1_JUIZ_1	GF-02	GF-02 Blast furnace gas	99	GJ								
AMB1_JUIZ_1	GF-05	GF-05 Natural gas	22	GJ								
AMB1_JUIZ_1	GF-05	GF-05 Natural gas	25	GJ								
AMB1_JUIZ_1	GF-05	GF-05 Natural gas	36	GJ								
AMB1_JUIZ_1	GF-05	GF-05 Natural gas	38	GJ								
AMB1_JUIZ_1	GF-05	GF-05 Natural gas	87	GJ								
AMB1_JUIZ_1	GF-05	GF-05 Natural gas	98	GJ								
AMB1_JUIZ_1	Ma-07	Ma-07 Collected end of life scrap	22	ton								
AMB1_JUIZ_1	Ma-08	Ma-08 Limestone	13	ton								
AMB1_JUIZ_1	Ma-10	Ma-10 Raw opiomite	13	ton								
AMB1_JUIZ_1	Ma-13	Ma-13 Lump ore	13	ton								
AMB1_JUIZ_1	Ma-31	Ma-31 FerroSilicium 100mm	23	ton								
AMB1_JUIZ_1	Ma-33	Ma-33 SilicoManganese	22	ton								
Total												

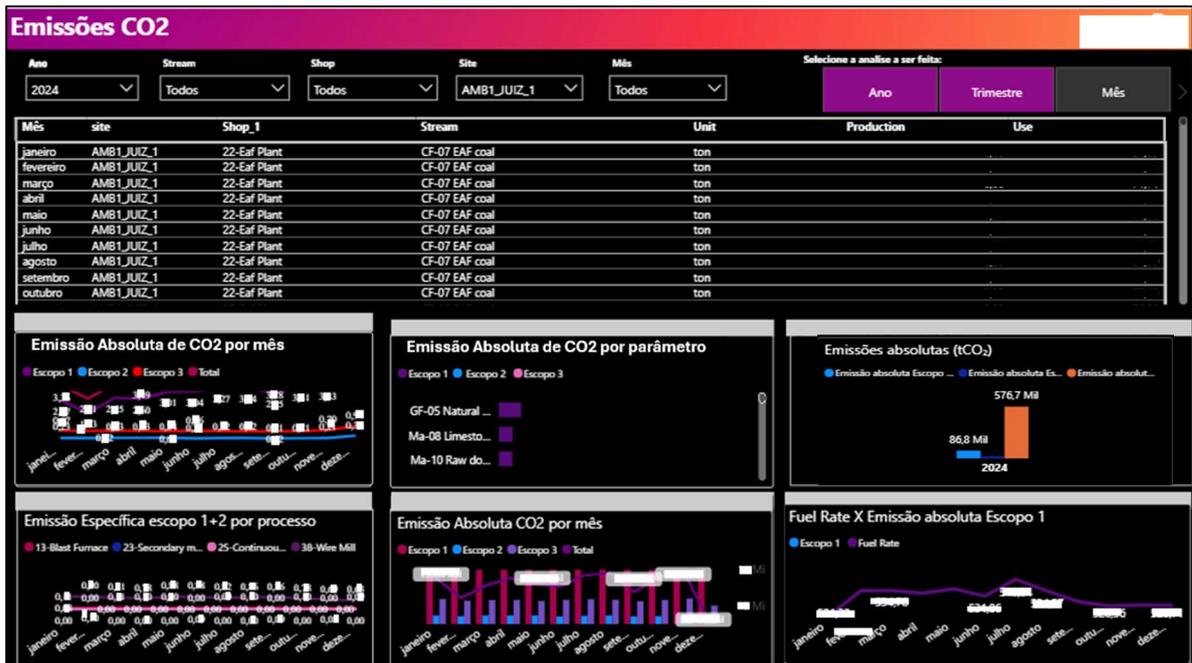
Fonte: *Power BI* Interno (2025).

O indicador de emissão específica é calculado pela razão entre a emissão absoluta de determinado parâmetro e a quantidade (em toneladas) do produto gerado no processo correspondente. Esse indicador é relevante para evidenciar as principais fontes emissoras associadas a cada etapa produtiva, auxiliando na priorização de ações de mitigação e controle.

A segunda tela elaborada (Figura 08) exibe uma visão interativa das emissões absolutas e específicas de CO₂, permitindo ao usuário segmentar a análise por ano, trimestre, mês, processo e parâmetro. Os dados podem ser visualizados em gráficos de barras, linhas e tabelas. Entre os destaques visuais estão:

- Gráfico de Emissão Absoluta de CO₂ por mês, segregado por Escopo (1, 2 e 3);
- Gráfico de Emissão Específica (Escopos 1 + 2) por processo, como alto-forno, aciaria e laminação;
- Gráfico de emissão por parâmetro, que permite identificar os principais insumos emissores;
- Gráfico de Emissão Absoluta de CO₂ por ano, segregado por Escopo (1, 2 e 3);
- Relação entre a taxa de combustível (*Fuel Rate*) e as emissões absolutas do Escopo 1, auxiliando na análise de eficiência energética.

Figura 08 – Tela para visualização gerencial dos indicadores



Fonte: *Power BI* Interno (2025).

Os dados visualizados no painel são oriundos diretamente do *datalake*. O painel está apto a receber atualizações periódicas automáticas, sem a necessidade de manipulação manual, garantindo maior agilidade e confiabilidade no acompanhamento dos indicadores.

Essa estrutura final possibilitou uma visualização intuitiva e objetiva dos dados de emissão de GEE, representando um avanço significativo em relação aos formatos anteriores utilizados pela empresa, que exigiam extrações manuais e cálculos externos. O painel consolidou-se como uma ferramenta essencial para a governança das informações ambientais, ampliando a transparência, acessibilidade e estratégia dentro da organização.

Como recomendação, visando a melhoria contínua da ferramenta de monitoramento de emissões de CO₂, sugere-se a inclusão de sinalizadores visuais automáticos que destaquem variações significativas entre os períodos analisados, como meses, trimestres ou anos. Essa funcionalidade pode ser implementada por meio de ícones, setas ou realces de cor que evidenciem aumentos ou reduções expressivas nas emissões.

Além disso, recomenda-se a padronização dos elementos visuais do painel, especialmente quanto ao uso consistente das cores associadas aos diferentes escopos (1, 2 e 3) e aos tipos de emissão (absoluta, específica, por processo ou por parâmetro). Essa uniformidade visual contribui para a clareza das informações apresentadas, facilita a interpretação dos dados por diferentes perfis de usuários e fortalece a capacidade analítica da ferramenta. A combinação entre padronização visual e sinalização de anomalias permite a identificação mais ágil de desvios críticos, tornando o painel mais eficiente, intuitivo e alinhado às boas práticas de visualização de dados.

5.4 Redução de tempo associada

A implantação da ferramenta automatizada para elaboração do inventário de GEE resultou em ganhos significativos de produtividade, redução de esforço operacional e melhoria na eficiência dos processos de gestão ambiental. Conforme demonstrado na Tabela 07, houve redução expressiva no tempo total demandado pelas equipes envolvidas, especialmente naquelas atividades anteriormente executadas manualmente.

Tabela 08 – Redução de tempo associada a automatização

Área Responsável	Processo	Método Antigo (Planilhas do Microsoft Excel®)		Automatizado	
		Frequência (Anual)	Tempo demandado (h)	Frequência (Anual)	Tempo demandado (h)
Equipe de Meio Ambiente/ Descarbonização	Gestão de dados	12	5	12	1
	Conversão e padronização de unidades	12	1	12	0
	Preenchimento da Planilha	12	2	-	-
	Auditoria interna de dados	12	2	12	2
	Análise dos Dados	12	2	12	0,5
	Validação dos Dados no <i>Power BI</i>	-	-	12	0,5
Equipe TI	Integração e envio para a base	-	-	12	0,5

do corporativo mundial		
Horas Totais	144	54

Fonte: Autora (2025).

A partir de estimativas validadas pela equipe técnica, verificou-se que o modelo manual de inventário, realizado por meio de planilhas Microsoft Excel® e com extração de dados não automatizada, embora fosse consolidado trimestralmente na prática, demandaria aproximadamente 144 horas por ano caso fosse aplicado com frequência mensal. Com a adoção do modelo automatizado, o tempo estimado de execução caiu para 54 horas por ano, evidenciando uma redução significativa no esforço operacional.

A principal mudança operacional foi a eliminação ou redução de etapas manuais como conversão de unidades de medida, preenchimento de planilhas e ajustes de fórmulas. As rotinas passaram a ser automatizadas por meio da integração com o *datalake*, concentrando-se nas etapas de verificação, validação e análise, conforme detalhado na Tabela 07. Destaca-se também o papel da equipe de TI, responsável pela extração e envio automático ao sistema corporativo global, atividade que anteriormente não ocorria.

Além da economia de tempo, o novo modelo viabilizou um salto qualitativo na gestão das emissões. O processo passou a contar com monitoramento mensal, proporcionando maior agilidade na identificação de desvios, frequência analítica mais elevada e respostas mais rápidas a variações operacionais. Em contraste com o modelo anterior, que limitava a visibilidade a ciclos trimestrais, a automação permite um fluxo contínuo de coleta, tratamento e reporte de dados fundamental para apoiar decisões estratégicas em projetos de descarbonização.

A ferramenta também contribuiu para a redução do risco de retrabalho e inconsistências, anteriormente observadas com frequência nas versões manuais, como erros de digitação, divergências entre planilhas e falhas de padronização. A estrutura automatizada assegura maior rastreabilidade, padronização e segurança dos dados, além de integração direta com sistemas corporativos, consolidando um processo mais confiável e robusto.

Em síntese, os resultados evidenciam que a automatização do inventário de GEE não apenas reduziu o esforço operacional, mas também viabilizou uma nova lógica de frequência, controle e governança, antes inviável no modelo manual.

6 CONCLUSÃO

O estudo viabilizou a implantação de uma ferramenta automatizada para cálculo do inventário de GEE em unidade operacional de uma multinacional da indústria do aço, sendo motivado pela necessidade de aprimorar a gestão das emissões, elevando o grau de rastreabilidade, frequência de atualização, governança e confiabilidade das informações reportadas.

A automatização foi concebida com base na metodologia da WSA adaptada a realidade operacional da unidade e implementada por meio da integração de dados operacionais em um ambiente de *datalake*, seguido de cálculos e validação em *Power BI*. O processo contemplou a padronização de insumos e produtos, mapeamento das fontes de dados, definição de regras de tratamento e implantação de painéis de validação e análise. Essa estrutura promoveu uma mudança significativa no modelo de inventário, que passou de um sistema trimestral, baseado em planilhas, para um modelo automatizado, validado mensalmente e com capacidade de análise estratégica integrada.

Entre os principais resultados, destaca-se a redução expressiva no tempo de elaboração dos inventários, com economia de 90 horas de trabalho por ano, mesmo com uma maior frequência de reporte. Além disso, houve eliminação de etapas manuais sujeitas a falhas, como preenchimento de planilhas e conversão de unidades, garantindo maior padronização e integridade dos dados. O processo também demonstrou aderência metodológica ao ser validado por uma auditoria externa independente, que confirmou a conformidade do inventário com os princípios de relevância, integralidade, consistência, transparência e exatidão preconizados pelo *GHG Protocol*.

Outro aspecto de destaque foi a implementação de um fluxo de MRV robusto, elemento central para assegurar a qualidade das informações ambientais em consonância com a Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/2009), o Decreto nº 11.075/2022 e, mais recentemente, a Lei nº 15.042/2024, que estabelece o SBCE. O MRV estruturado neste projeto é composto por fontes confiáveis de dados, registros auditáveis e sistema formal de validação interna com segregação de responsabilidades, em total alinhamento com os

requisitos de sistemas regulados de carbono e com as exigências internacionais de reporte, como a CSRD e os Padrões Europeus de Relato de Sustentabilidade (ESRS).

Entretanto, é necessário reconhecer que a confiabilidade da automatização depende diretamente da qualidade das informações de origem, da manutenção contínua dos sistemas e do engajamento dos usuários. A complexidade envolvida em integrar diferentes áreas e garantir a consistência metodológica representa um desafio contínuo para a consolidação do modelo em larga escala.

De toda forma, a automatização não apenas aprimorou a eficiência operacional, como também agregou valor estratégico a gestão de dados de carbono da companhia, fornecendo dados em tempo real para suporte a tomada de decisão, planejamento de metas de descarbonização e fortalecimento da transparência corporativa.

Nesse sentido, a ferramenta automatizada de inventário de GEE consolida-se como uma inovação relevante para o setor industrial, aliando tecnologia, governança e sustentabilidade, contribuindo diretamente para o posicionamento da empresa frente as crescentes exigências ambientais, sociais e regulatórias, tanto no Brasil quanto no exterior.

7 REFERÊNCIAS

ABM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO (org.). **Siderurgia: uma visão geral**. 2024. Coordenação de José Roberto Bolota. São Paulo: Edgard Blücher, 2024.

AGÊNCIA SENADO. **Protocolo de Kyoto**. 2022. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/protocolo-de-kyoto> > Acesso em: 12 jan. 2024

ARCELORMITTAL BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2023**. 2023. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/relatorio-de-sustentabilidade/>. Acesso em: 15 de Dezembro de 2024.

ARCELORMITTAL BRASIL. **Produtos e soluções**. 2024a. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes>. Acesso em: 21 nov. 2024.

ARCELORMITTAL BRASIL. **A presença do aço no dia a dia**. 2024b. Disponível em: <<https://blog.arcelormittal.com.br/presenca-do-aco-no-dia-a-dia/>>. Acesso em: 21 nov. 2024.

BNDES. **Minério de ferro: mercado, produção e beneficiamento**. BNDES Setorial, n. 39, p. 325-366, mar. 2014. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4802/1/BS%2039%20min%c3%a9rio%20de%20ferro_P.pdf. Acesso em: 15 jun. 2025.

BRASIL, G. H., SOUZA JR., P. A., & CARVALHO JR., J. A. **Inventários corporativos de gases de efeito estufa: métodos e usos**. 2008a. *Revista Eletrônica Sistemas & Gestão*, 3(1), 15-26.).

BRASIL. **Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol: Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. 2008b. 2ª ed. Disponível em: <https://www.fgv.br/ces/ghg>. Acesso em: 13 jan. 2025.

BRASIL. **Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC)**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/painel-intergovernamental-sobre-mudanca-do-clima-ipcc>. Acesso em: 12 jan. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022**. 2022. Estabelece os procedimentos para a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas e regulamenta o SBCE. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 20 maio 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 dez. 2009. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm. Acesso em: 18 maio 2025.

BRASIL. **Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024.** Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 12 dez. 2024.

BRASIL. **Ministério da Fazenda.** *Conheça mais detalhes das cinco fases de implementação do mercado de carbono no Brasil.* 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/assuntos/noticias/2024/dezembro/conheca-mais-detalhes-das-cinco-fases-de-implementacao-do-mercado-de-carbono-no-brasil>. Acesso em: 18 maio 2025.

BRASIL. **Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Fatores de Emissão – Dados e Ferramentas.** Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE). 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>. Acesso em: 22 jul. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Adaptação a Mudança do Clima – PNA.** Brasília: MMA, 2016.

BRAZ, Mário Sérgio Araújo. **Os mecanismos de cooperação internacional para redução de emissões sob o Protocolo de Quioto.** Boletim Científico Escola Superior do Ministério Público da União, Brasília, n. 9, p. 139-159, 2003.

CALLISTER, W. D., JR., & RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 9ª ed. Tradução: Sérgio Murilo M. Meira. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAMPELLO, L. G. B.; LIMA, R. D. **O regime internacional de mudanças climáticas: uma análise da cooperação internacional solidária no acordo de paris.** Revista Argumentum. Marília/SP, v. 19, n. 3, 2018.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; MELO, L. **Panoramas Setoriais - Siderurgia.** 2015. Revista BNDES Setorial, n. 41, mar. 2015

COMISSÃO EUROPEIA. **Executando o Pacto Ecológico Europeu.** 2021. Disponível em: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_pt. Acesso em: 23 jan. 2025.

DIÁRIO DO COMÉRCIO. **Usina de Juiz de Fora é referência para a ArcelorMittal.** 2022. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/negocios/usina-juiz-de-fora-arcelor-mittal/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

DORILEO, Ivo Leandro; JUNIOR, Herculano Xavier Da Silva; BERNI, Mauro Donizeti; MESA, Juan Miguel Perez. **Centros de transformação: unidades integradas para produção de coque.** Cambuí: [s.n.], 2010.

ECHTERHOF, T. **Review on the use of alternative carbon sources in EAF steelmaking.** 2021. Metals, v. 11, p. 222, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met11020222>. Acesso em: 23 jan. 2025.

EFRAG. **Draft ESRS E1 Climate Change.** 2022. Disponível em: <https://www.efrag.org/sites/default/files/sites/webpublishing/SiteAssets/08%20Draft%20>

ESRS%20E1%20Climate%20Change%20November%202022.pdf> Acesso em: 05 dez. 2024

EUROPEAN COMMISSION. **Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 amending Regulation (EU) No 537/2014, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Directive 2013/34/EU, as Regards Corporate Sustainability Reporting.** Off. J. Eur. Union., v. 50, p. 48-119, 2022.

FGV - FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. **Programa Brasileiro GHG Protocol. Centro de Estudos em Sustentabilidade – FGVces.** Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>. Acesso em: 22 jul. 2025.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBA. **Carvão Vegetal.** Disponível em: <https://www.iba.org/carvao-vegetal-2>. Acesso em: 24 jan. 2025.

IBM. **O que é a Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD).** 2023. Disponível em: <<https://www.ibm.com/br-pt/topics/csr-d>>. Acesso em: 06 nov. 2024.

IBM. **Emissões do escopo 3.** 2025. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/topics/scope-3-emissions>. Acesso em: 25 jul. 2025.

IPAM AMAZÔNIA. **CO2 equivalente (CO2e).** 2024. Disponível em: <<https://ipam.org.br/glossario/co2-equivalente-co2e/>>. Acesso em: 26 jan. 2025

IPCC. **AR6 – Sixth Assessment Report.** 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

IPCC. **Global Warming Potential Values.** 2024a. Documento atualizado com valores do AR6. Disponível no arquivo compartilhado. Acesso em: 22 jan. 2025.

IPCC. **Introduction to the 2006 guidelines.** 2000. Disponível em: 116 https://www.ipcc.nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_1_Ch1_Introduction.pdf. Acesso em: 12 jan. 2025.

IEA - INTERNACIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Iron & steel.** 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/industry/steel>. Acesso em: 21 nov. 2024.

IABr - INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico 2024.** 2024b. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2024.

IABr - INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatísticas da Siderurgia – 3º Trimestre 2024.** 2024a. Instituto Aço Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br>. Acesso em: 23 jan. 2025.

JACOMINO, V. M. F.; DE CASTRO, L. F. A; RIBEIRO, E. D. L.; LEÃO, M. M. D.; DE SOUZA, C. M.; GOMES, A. M.; ALMEIDA, M. L. B.; LOPES, L. E. F. **Controle Ambiental das Indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal.** Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302p.

JUNQUEIRA, A. A., JUNQUEIRA, G. F. A., SILVA, V. C. M., ATAÍDE, D. H. S., SOUZA, M. P., & CARVALHO, A. M. (2020). **Produção de carvão vegetal pela silvicultura brasileira**. Anais do II Simpósio de Ciências Florestais do Espírito Santo: Multidisciplinaridade do Setor Florestal: Tecnologias, Produtos e Atualidades, p. 480-486.

KPMG. **Indústria do aço: sustentável? Caminhos para uma transição e desenvolvimento mais sustentável**. 2024. Disponível em: <https://kpmg.com/br/pt/home/insights/2024/10/industria-aco-sustentavel-transicao-desenvolvimento-mais-sustentavel.html>. Acesso em: 22 jul. 2025.

LUZ, Adão Benvido da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Sílvia Cristina Alves (eds.). **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 965 p.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Para MCTI, mercado de carbono precisa de sistema robusto sobre dados de emissões**. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2023/11/para-mcti-mercado-de-carbono-precisa-de-sistema-robusto-sobre-dados-de-emissoes>> Acesso em: 21 nov. 2024.

MORAIS, F. F. **Alto-forno sustentável: O mercado de carbono no Brasil com ênfase na produção de gusa a partir de carvão vegetal de florestas plantadas de eucalipto**. 2008. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MORAIS, W. A. **Estudo do processo de trefilação de fios de cobre através de uma máquina de tração**. In: 72º Congresso Anual da ABM – Internacional e 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas. São Paulo, SP, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/320726360>. Acesso em: 26 jan. 2025.

MOREIRA, H., & BUENO DOS REIS GIOMETTI, A. **O Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de projetos em energia limpa**. 2008. *Contexto Internacional*, 30(1), 9-47.

MOURÃO, M. B. **Introdução a Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

OBSERVATÓRIO DA MINERAÇÃO. **Mineradoras e siderúrgicas emitem 107 milhões de toneladas de CO₂ por ano no Brasil, e soluções de mercado não dão resultado**. 2022. Disponível em: <https://observatoriodamineracao.com.br/mineradoras-e-siderurgicas-emitem-107-milhoes-de-toneladas-de-co2-por-ano-no-brasil-e-solucoes-de-mercado-nao-dao-resultado/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

ONU - NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **O que são mudanças climáticas?**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-s%C3%A3o-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas>. Acesso em: 12 jan. 2025.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **O que são mudanças climáticas?** Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-s%C3%A3o-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas>. Acesso em: 22 jul. 2025.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Acordo de Paris sobre o clima**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/88191-acordo-de-paris-sobre-o-clima>. Acesso em: 22 jul. 2025.

PAULA, A. de O.; ARAÚJO, A. M.; RIBEIRO, S. R.; FURTADO, T. L. C.; LIMA, W. L. de S. **Aciaria elétrica e utilização de gusa líquido**. Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, Salvador, BA, 15 a 18 de maio de 2011. Disponível em: <link do documento>. Acesso em: 26 jan. 2025.

PMR BRASIL. **Síntese das Análises e Resultados do Projeto PMR Brasil – Parceria para Prontidão para o Mercado de Carbono**. Ministério da Fazenda / Banco Mundial. Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/pmr/relatorio-sintese-pmr.pdf>. Acesso em: 18 maio 2025.

SABLOWSKI, A. L. M., 2008. **Balanco de materiais na gestão ambiental da cadeia produtiva do carvão vegetal para produção de ferro gusa em Minas Gerais**. 2008. 164 f. Tese (Doutorado) - UNB, Brasília, 2008. Disponível em: <https://www.repositorio.unb.br/handle/10482/1039>. Acesso em: 15 jun. 2025.

TORRES, Tácio Oliveira. **Estudo de caso em um aciaria elétrica: análise crítica de produtividade e avaliação de perdas metálicas nas etapas de refino secundário e lingotamento contínuo**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, Lorena, 2023.

UNIÃO EUROPEIA (2022). **Diretiva (UE) 2022/2464 do Parlamento Europeu e do Conselho de 14 de dezembro de 2022**. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2022.322.01.0015.01.POR&toc=OJ%3AL%3A2022%3A322%3ATOC. Acesso em: 21 jan. 2025.

WAY CARBON. **8 motivos para fazer seu inventário de carbono com o Climax**. 2022. Disponível em: < <https://blog.waycarbon.com/2022/03/8-motivos-para-fazer-seu-inventario-de-carbono-com-o-climax/> > Acesso em: 01 dez. 2024.

WSA - WORLD STEEL ASSOCIATION. **What is steel?**. 2024a. Disponível em: <https://worldsteel.org/about-steel/what-is-steel/>. Acesso em: 21 nov. 2024.

WSA - WORLD STEEL ASSOCIATION. **The Steel Story: Tracing Steel's Development from 2,000 BC to the Innovations of Today**. 2023. World Steel Association, 2023.

WSA - WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel Facts**. 2025. World Steel Association, 2025.

WSA - WORLD STEEL ASSOCIATION. **CO2 Data Collection: User Guide, version 11**. 2024b. Disponível em: <https://worldsteel.org>. Acesso em: 21 jan. 2025.

WRI BRASIL. **4 gráficos para entender as emissões de gases de efeito estufa por país e por setor**. 2024. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/4-graficos-para-entender-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-por-pais-e-por-setor>. Acesso em: 21 jan. 2025.

WWF. **Acordo de Paris completa cinco anos com lições aprendidas.** 2022. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?77471/Acordo-de-Paris-completa-cinco-anos-com-licoes-aprendidas>> Acesso em 12 jan. 2025.

ZHANG, Jinghua; GUO, Haoyu; YANG, Gaiyan; WANG, Yan; CHEN, Wei. **Sustainable transition pathways for steel manufacturing: low-carbon steelmaking technologies in enterprises.** 2025. Sustainability, Basel, v. 17, n. 12, p. 1–37, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17125329>. Acesso em: 24 jul. 2025.

APÊNDICE A – Perguntas realizadas nas entrevistas semiestruturadas para entendimento da origem das informações.

Pergunta	Parâmetro Impactado	Área do respondente	Resposta
Qual unidade de medida que a área de utilidades reporta o consumo do nitrogênio para a controladoria da unidade?	Ut-07	Gerência de Utilidades	m ³
Qual unidade de medida que a área de utilidades reporta o consumo do argônio para a controladoria da unidade?	Ut-08	Gerência de Utilidades	m ³
Qual unidade de medida que a área de utilidades reporta o consumo do oxigênio para a controladoria da unidade?	Ut-05	Gerência de Utilidades	m ³
Qual unidade de medida que a área de utilidades reporta o consumo do ar comprimido para a controladoria da unidade?	Ut-09	Gerência de Utilidades	m ³
Qual unidade de medida que a área de utilidades reporta o consumo do gás de alto-forno para a controladoria da unidade?	GF-02	Gerência de Utilidades	m ³
Qual unidade de medida que a área de utilidades reporta o consumo do gás natural para a controladoria da unidade?	GF-05	Gerência de Utilidades	m ³
Qual a unidade medida a controladoria considera no fechamento dos dados de nitrogênio ? É realizada alguma conversão?	Ut-07	Controladoria	m ³
Qual a unidade medida a controladoria considera no fechamento dos dados de argônio ? É realizada alguma conversão?	Ut-08	Controladoria	m ³

Pergunta	Parâmetro Impactado	Área do respondente	Resposta
Qual a unidade medida a controladoria considera no fechamento dos dados de oxigênio ? É realizada alguma conversão?	Ut-05	Controladoria	m ³
Qual a unidade medida a controladoria considera no fechamento dos dados de ar comprimido ? É realizada alguma conversão?	Ut-09	Controladoria	m ³
Qual a unidade medida a controladoria considera no fechamento dos dados de gás de alto-forno ? É realizada alguma conversão?	GF-02	Controladoria	GJ (multiplica o apurado em m ³ por 0,03887)
Qual a unidade medida a controladoria considera no fechamento dos dados de gás natural ? É realizada alguma conversão?	GF-05	Controladoria	GJ (multiplica o apurado em m ³ por 0,03887)
Quais áreas tem consumos de nitrogênio lançados no SAP?	Ut-07	Controladoria	Alto Forno, Aciaria, Laminação e Trefilaria
Quais áreas tem consumos de argônio lançados no SAP?	Ut-08	Controladoria	Aciaria
Quais áreas tem consumos de oxigênio lançados no SAP?	Ut-05	Controladoria	Alto Forno e Aciaria
Quais áreas tem consumos de ar comprimido lançados no SAP?	Ut-09	Controladoria	Aciaria, Laminação e Trefilaria
Quais áreas tem consumos de gás natural lançados no SAP?	GF-02	Controladoria	Alto Forno e Laminação
Quais áreas tem consumos de gás de alto-forno lançados no SAP?	GF-05	Controladoria	Aciaria, Laminação e Trefilaria
Qual código SAP registrado o consumo de Calcario?	Ma-08	Gerência de Redução	7071945

Pergunta	Parâmetro Impactado	Área do respondente	Resposta
Qual código SAP registrado o consumo de Dolomita Bruta?	Ma-10	Gerência de Redução	7071946
Descrição e códigos SAP aplicáveis para cálculo do carvão orgânico interno.	Cf-13a	Gerência de Redução	<p>O valor deve ser um cálculo: Passo 1: Pegar o valor do cód 103089 do SAP (CKM3) na linha "Entradas>produção" e multiplicar por 0,001 Passo 2: Pegar o dado código 7070917 da SAP (CKM3) na linha "consumo > centro de custo" e multiplicar por 0,001 Passo 3: Pegar o valor do código 7070917 da SAP (CKM3) na linha "outras entradas > consumo" e DIMINUIR do valor do passo 2 Passo 4: Pegar o valor da SAP (CKM3) dos códigos 7070994 e 29350 na linha "consumo > produção" e Diminuir por todos os valores do passos 1, 2 e 3. Passo 5: O resultado do passo 5 deverá ser multiplicado por uma fator de % de carvão de origem vegetal PLANTADA que está no PBI da BioFlorestas que estará no Sistema Interno SIG. Esse resultado deverá ser enviado para CF-13a.</p>
Descrição e códigos SAP aplicáveis para cálculo do carvão orgânico externo.	Cf-13b	Gerência de Redução	<p>Mesma conta do CF-13a com dados da CKM3, única mudança será no passo 5 , que será: O resultado do passo 5 deverá ser multiplicado por uma fator de % de carvão de origem vegetal NATIVA que está no PBI da BioFlorestas que estará no SIG Farol. Esse resultado deverá ser enviado para CF-13b.</p>

Fonte: Autora (2024).

APÊNDICE B – Planilha controle com descrição detalhada de todos os dados brutos necessários ao inventário de GEE da unidade operacional em estudo.

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1edz8RmnJ9JromEqC6Xdl-UHhRu28wu-
uI9FnXZ6CgU0/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1edz8RmnJ9JromEqC6Xdl-UHhRu28wu-
uI9FnXZ6CgU0/edit?usp=sharing)

Fonte: Autora (2024).

ANEXO A – Fatores de Emissões Diretas (Escopo 1)

Item	Unit	Default carbon content tC/unit)	Default ncv (Gj/unit)	Conversion factor (tCO ₂ /Gj)	Direct Emission factor (tCO ₂ /unit)	Reference
Iron ore	dry t	0.010		0.000	0.037	worldsteel
Coking coal	dry t	0.835	32.200	0.095	3.060	IEA
BF injection coal	dry t	0.806	31.100	0.095	2.953	IEA
Sinter/BOF coal	dry t	0.760	29.300	0.095	2.785	IEA
Steam coal	dry t	0.672	25.900	0.095	2.462	IEA
EAF coal	dry t	0.889	30.100	0.108	3.257	IEA
SR/DRI coal	dry t	0.806	31.100	0.095	2.953	worldsteel
Coke	dry t	0.889	30.100	0.108	3.257	worldsteel
Charcoal	dry t		18.800			worldsteel
Petroleum coke	t	0.850	31.935	0.098	3.115	EN 19694
Used plastic	t		46.000	0.053	2.416	EN 19694
Used tires	t		35.000	0.063	2.199	EN 19694
Heavy oil	m ³		37.700	0.077	2.907	IEA
Light oil	m ³		35.100	0.074	2.601	IEA
Kerosene	m ³		34.700	0.072	2.481	IEA
LPG	t		47.300	0.631	2.985	IEA
LNG	k.Nm ³	0.550	35.900	0.056	2.015	worldsteel
Natural gas	k.Nm ³	0.550	35.900	0.056	2.015	IEA
Limestone	dry t	0.120			0.440	IPCC
Crude dolomite	dry t	0.130			0.476	worldsteel
EAF/BOF electrodes	t				3.663	IPCC
Low carbon iron units	t	0.047	20.900	0.008	0.172	worldsteel
Pig iron	t	0.047	20.900	0.008	0.172	worldsteel
Cold iron	t	0.047	20.900	0.008	0.172	ISO14404
Ni pig iron	t	0.005			0.018	ISSF
Charcoal based pig iron	t	0.047	20.900	0.008	0.172	worldsteel
Biomass	t	0.476	15.600			IPCC
Gas based DRI	t	0.020	14.100	0.005	0.073	IPCC
Coal based DRI	t	0.020	17.900	0.004	0.073	IPCC
Low carbon DRI	t	0.020	14.100	0.005	0.073	worldsteel
Ferro-Nickel	t	0.010			0.037	ISSF
Nickel oxides	t	0.001			0.004	ISSF
Nickel metal	t	0.001			0.004	ISSF
Ferro-Chromium	t	0.075			0.275	ISSF
Molybdenum oxides	t	0.001			0.004	ISSF
Ferro-Molybdenum	t	0.005			0.018	ISSF
Ferro-Manganese	t	0.050			0.183	ISSF
Ferro-Silicon	t	0.001			0.004	IPCC
Silico-Manganese	t	0.005			0.018	IPCC
Silicon (Metal)	t	0.001			0.004	IPCC
Coke oven gas	k.Nm ³	0.228	19.000	0.044	0.835	worldsteel
Blast furnace gas	k.Nm ³	0.243	3.300	0.270	0.890	worldsteel
BOF gas	k.Nm ³	0.413	8.400	0.180	1.513	worldsteel
Coal tar	t		37.000	0.092	3.389	WRI
Benzol	t		40.570	0.083	3.382	worldsteel

Fonte: CO2 Data Collection User Guide, version 11(WSA, 2024)

ANEXO B – Fatores de Emissões Indiretas (Escopos 2 e 3)

Item	Unit	Energy Equiv. Value (GJ/unit)	Upstream Emission Factor (tCO ₂ /unit)		Reference
			Scope 2	Scope 3	
Coke	dry t			0.224	worldsteel
Heavy oil	m ³			0.276	IEA
Light oil	m ³			0.247	IEA
Kerosene	m ³			0.247	IEA
LNG	k.Nm ³			0.665	worldsteel
Green hydrogen	t			0.000	worldsteel
Blue hydrogen	t			1.800	worldsteel
Grey hydrogen	t			19.800	Verma & Kumar, 2015
Burnt Lime	t	4.500		0.950	worldsteel
Burnt Dolomite	t	4.500		1.100	worldsteel
Sinter	t	2.450		0.262	worldsteel
Pellets	t	2.100		0.137	worldsteel
EA/BOF electrodes	t			0.650	worldsteel
Low carbon iron units	t	20.900		1.855	worldsteel
Pig iron	t	20.900		1.855	worldsteel
Cold iron	t	20.900		1.855	worldsteel
Ni pig iron	t			5.200	ISSF
Charcoal based pig iron	t	20.900		1.855	worldsteel
Gas based DRI	t	14.100		0.780	worldsteel
Coal based DRI	t	17.900		1.210	worldsteel
Low carbon DRI	t	14.100		0.780	worldsteel
Ferro-Nickel	t			8.676	ISSF
Nickel oxides	t			20.279	ISSF
Nickel metal	t			13.579	ISSF
Ferro-Chromium	t			5.987	ISSF
Molybdenum oxides	t			6.500	ISSF
Ferro-Molybdenum	t			8.500	ISSF
Ferro-Manganese	t			2.789	ISSF
Ferro-Silicon	t			4.000	IPCC
Silico-Manganese	t			1.400	IPCC
Silicon (Metal)	t			5.000	IPCC
Electricity	MWh	9.800	0.504		IEA
Steam	t	3.800	0.195		IEA
Oxygen	k.Nm ³	6.900		0.355	IEA
Nitrogen	k.Nm ³	2.000		0.103	IEA
Argon	k.Nm ³	2.000		0.103	worldsteel
Waste heat	GJ	1.000		0.051	worldsteel
Coke oven gas	k.Nm ³	19.000	0.977		worldsteel
Blast furnace gas	k.Nm ³	3.300	0.170		worldsteel
BOF gas	k.Nm ³	8.400	0.432		worldsteel
Ethanol	m ³	23.575		1.494	IPCC
Methanol	m ³	15.662		1.369	IPCC
Ammonia	t	37.500		1.600	IPCC

Fonte: CO2 Data Collection User Guide, version 11(WSA, 2024)

ANEXO C – Lista de codificação de insumos e produtos

Categoria	Códigos	Descrição	Unidade de Medida
Produtos	Pr-01	Sinter	Ton
Produtos	Pr-02	Gusa de Alto-Forno	Ton
Produtos	Pr-02a	Ferro-gusa de Bio Carvão	Ton
Produtos	Pr-02b	Ferro-gusa de Não Bio Carvão	Ton
Produtos	Pr-03	Ferro Esponja	Ton
Produtos	Pr-04	Gusa de Fusão Redutora	Ton
Produtos	Pr-05	Aço Líquido de Convertedor	Ton
Produtos	Pr-06	Aço Líquido de FEA	Ton
Produtos	Pr-07	Aço Líquido para Lingotamento	Ton
Produtos	Pr-08	Lingotes	Ton
Produtos	Pr-09	Aço Bruto de Lingotamento Contínuo	Ton
Produtos	Pr-10	Semi Produtos de Desbastador	Ton
Produtos	Pr-11	Billets	Ton
Produtos	Pr-12	Bobinas a Quente	Ton
Produtos	Pr-13	Chapas	Ton
Produtos	Pr-14	Barras	ton
Produtos	Pr-15	Perfis	ton
Produtos	Pr-16	Fio Máquina	ton
Produtos	Pr-17	Tubos sem costura	ton
Produtos	Pr-18	Bobinas decapadas	ton
Produtos	Pr-19	Bobinas a frio	ton
Produtos	Pr-20	Bobinas Recozidas	ton
Produtos	Pr-21	Bobinas Galvanizadas	ton
Produtos	Pr-22	Bobinas Eletro galvanizadas	ton
Produtos	Pr-23	Bobinas estanhadas	ton
Produtos	Pr-24	Bobinas Cromadas	ton
Produtos	Pr-25	Bobinas Pintadas	ton
Produtos	Pr-26	Produtos Acapados	ton
Produtos	Pr-27	Bobinas Refundidas	ton
Produtos	Pr-28	Placas Cortadas	ton
Produtos	Pr-29	Moldes	ton
Produtos	Pr-30	Tubos Soldados	ton
Produtos	Pr-31	Placas Soldadas	ton
Produtos	Pr-32	Trefilados	ton
Produtos	Pr-33	Peças de Fundição	ton
Produtos	Pr-34	Peças Forjadas	ton
Produtos	Pr-35	Esponja/Gusa de Tratamento de Pó	ton

Categoria	Códigos	Descrição	Unidade de Medida
Produtos	Pr-36	Madeira	ton
Produtos	Pr-37	Run of mine ore	ton
Produtos	Pr-38	Beneficiated ore	ton
Produtos	Pr-39	Beneficiation tailings	ton
Produtos	Pr-40	Pellets	ton
Produtos	Pr-41	Run of mine coal	ton
Produtos	Pr-42	Washed coal	ton
Produtos	Pr-43	Washing midlings	ton
Produtos	Pr-44	Washing tailings	ton
Produtos	Pr-45	Produtos Cerâmicos	ton
Combustíveis Condensados	CF-01a	Coque	ton
Combustíveis Condensados	CF-01b	Coque	ton
Combustíveis Condensados	CF-01c	Coque	ton
Combustíveis Condensados	CF-02	Coque Breeze	ton
Combustíveis Condensados	CF-03	Carvão para coque	ton
Combustíveis Condensados	CF-04	Antracito	ton
Combustíveis Condensados	CF-05	Carvão para PCI	ton
Combustíveis Condensados	CF-06	Carvão para fusão redutora	ton
Combustíveis Condensados	CF-07	Carvão para FEA	ton
Combustíveis Condensados	CF-08	Coque de Petróleo	ton
Combustíveis Condensados	CF-09	Óleo Pesado	ton
Combustíveis Condensados	CF-10	Óleo Leve	m3
Combustíveis Condensados	CF-11	Óleo Diesel	m3
Combustíveis Condensados	CF-11a	Gasolina	m3
Combustíveis Condensados	CF-12	GLP	GJ
Combustíveis Condensados	CF-13	Carvão Vegetal	ton
Combustíveis Condensados	CF-13a	Carvão orgânico interno	ton
Combustíveis Condensados	CF-13b	Carvão orgânico externo	ton
Combustíveis Condensados	CF-13c	Carvão-Fino	ton
Combustíveis Condensados	CF-14	Gorduras de Animais	ton
Combustíveis Condensados	CF-15	Melaço	ton
Combustíveis Condensados	CF-16	Plásticos Usados	ton
Combustíveis Condensados	CF-17	Pneus Usados	ton
Combustíveis Condensados	CF-18	Bio Combustível	m3
Combustíveis Condensados	CF-19	Outro Combustível	ton
Combustíveis Condensados	CF-20	Microplásticos	ton
Gases Combustíveis	GF-01	Gás de Coqueria	GJ
Gases Combustíveis	GF-02	Gás de Alto-Forno	GJ

Categoria	Códigos	Descrição	Unidade de Medida
Gases Combustíveis	GF-03	Gás de Fusão Redutora	GJ
Gases Combustíveis	GF-04	Gás de Convertedor	GJ
Gases Combustíveis	GF-05	Gás Natural	GJ
Gases Combustíveis	GF-06	Outro Gás	GJ
Gases Combustíveis	GF-06a	Gás Natural Líquido	GJ
Gases Combustíveis	GF-07	Metano	GJ
Utilidades	Ut-01	Eletricidade	MWh
Utilidades	Ut-02	Vapor de Alta Pressão	ton
Utilidades	Ut-03	Vapor de Baixa Pressão	ton
Utilidades	Ut-03Recovery	Recuperação - Vapor de Baixa Pressão	ton
Utilidades	Ut-04	Água Quente	ton
Utilidades	Ut-04Recovery	Recuperação - Água Quente	ton
Utilidades	Ut-05	Oxigênio de Alta-Pureza	103.m3N
Utilidades	Ut-06	Oxigênio de Baixa-Pureza	103.m3N
Utilidades	Ut-07	Nitrogênio	103.m3N
Utilidades	Ut-08	Argônio	103.m3N
Utilidades	Ut-09	Ar Comprimido	103.m3N
Utilidades	Ut-10	Hidrogênio	103.m3N
Materiais	Ma-01	Eletrodo de FEA	ton
Materiais	Ma-02	Eletrodo de forno de redução	ton
Materiais	Ma-03	Ferro Cromo	ton
Materiais	Ma-04	Ferro Manganês	ton
Materiais	Ma-05	Níquel	ton
Materiais	Ma-06	Sucata nova externa	ton
Materiais	Ma-07	Sucata coletada fim de vida	ton
Materiais	Ma-08	Calcario	ton
Materiais	Ma-09	Cal	ton
Materiais	Ma-10	Dolomita bruta	ton
Materiais	Ma-11	Dolomita calcinada	ton
Materiais	Ma-12	Minério de Ferro Fino	ton
Materiais	Ma-13	Minério fixo	ton
Materiais	Ma-14	Pellets	ton
Materiais	Ma-15	Bedding sinter	ton
Materiais	Ma-16	Bentonite	ton
Materiais	Ma-27	Ferro Nóbio	ton
Materiais	Ma-28	Ferro Titânio	ton
Materiais	Ma-31	FerroSilicium 100mm	ton

Categoria	Códigos	Descrição	Unidade de Medida
Materiais	Ma-33	Silico Manganês	ton
Materiais	Ma-36	Ferro Molibdênio	ton
Materiais	Ma-47	Ferro Vanádio	ton
Materiais	Ma-48	Produto de captura e utilização de carbono 1	ton
Materiais	Ma-49	Produto de captura e utilização de carbono 2	ton
Materiais	Ma-50	Zinco (para revestimento)	ton
Materiais	Ma-51	Magnésio (para revestimento)	ton
Materiais	Ma-52	Lata (para revestimento)	ton
Materiais	Ma-53	Alumínio	ton
Materiais	Ma-54	Silício (para revestimento)	ton
Materiais	Ma-55	Cromo (para revestimento de estanho)	ton
Materiais	Ma-56	Pintar	ton
Materiais	Ma-57	Solventes (para revestimento orgânico)	ton
Materiais	Ma-58	Ácidos (para laminação a frio)	ton
Materiais	Ma-59	Fertilizantes Nitrogenados 8%	ton
Materiais	Ma-60	Fertilizantes Nitrogenados 10%	ton
Materiais	Ma-61	Fertilizantes Nitrogenados 18%	ton
Materiais	Ma-62	Outras ligas de ferro	ton
Materiais	Ma-63	Outros materiais minerais	ton
Resíduos	Res-01	Alcatrão	ton
Resíduos	Res-02	Benzol	ton
Resíduos	Res-03	Óleo Naftaleno	m3
Resíduos	Res-04	Pó de CDQ	ton
Resíduos	Res-05	Finos da Extinção de Coque	ton
Resíduos	Res-06	Pó de Limpeza de Gás de Alto-Forno	ton
Resíduos	Res-07	Lama de Alto-Forno	ton
Resíduos	Res-08	Escória de Alto-Forno Granulada	ton
Resíduos	Res-09	Finas de Peneiramento de minério reduzido	ton
Resíduos	Res-10	Pó de Limpeza de gás de fusão redutora	ton
Resíduos	Res-11	Pó do Gás de Convertedor LD	ton
Resíduos	Res-12	Lama do Convertedor LD	ton
Resíduos	Res-13	Sucata Metálica Interna	ton

Fonte: Documento Interno (2024).

ANEXO D – Lista de codificação de processos

Segmento	Código	Processo
Siderurgia	11	Coqueria
Siderurgia	12	Sinterização
Siderurgia	103	Pelotização
Siderurgia	13	Alto-Forno
Siderurgia	14	Redução Direta
Siderurgia	15	Redução de fusão
Siderurgia	21	Aciaria LD
Siderurgia	22	Aciaria Elétrica
Siderurgia	23	Metalurgia Secundária
Siderurgia	24	Fundição de Lingote
Siderurgia	25	Lingotamento Contínuo
Siderurgia	26	Briquetagem
Siderurgia	31	Laminador de desbaste
Siderurgia	32	Laminador de tarugos
Siderurgia	33	Laminador de tiras a quente
Siderurgia	34	Laminador compacto
Siderurgia	35	Laminador de chapas grossas
Siderurgia	36	Laminador de barras
Siderurgia	37	Laminador de perfis
Siderurgia	38	Laminador de fio máquina
Siderurgia	39	Laminador de tubos
Siderurgia	41	Linhas de decapagem
Siderurgia	42	Laminação a Frio
Siderurgia	43	Recozimento contínuo
Siderurgia	44	Recozimento descontínuo
Siderurgia	51	Galvanização por imersão a quente
Siderurgia	52	Eletro galvanização
Siderurgia	53	Estanhagem por eletrodeposição
Siderurgia	54	ECCS
Siderurgia	61	Revestimento orgânico
Siderurgia	71	Fornos de cal
Siderurgia	72	Fundição
Siderurgia	73	Forja

Segmento	Código	Processo
Siderurgia	74	Tratamento de pó
Siderurgia	75	Plantação
Siderurgia	76	Produção de carvão vegetal
Siderurgia	81	Acabamento
Siderurgia	82	Linhas de tiras cortadas
Siderurgia	83	Linhas de placas cortadas
Siderurgia	84	Linhas de tiras perfiladas
Siderurgia	85	Tubos soldados
Siderurgia	86	Bonecos soldados
Siderurgia	87	Trefilação de arame
Siderurgia	93	Planta de Oxigênio
Siderurgia	94	Compressão de Ar
Siderurgia	098a	Planta de Hidrogênio
Siderurgia	098b	Planta de Captura e Utilização de Carbono (CCU)
Siderurgia	99	Flares
Geral	91	Plantas de geração de energia
Geral	92	Caldeiras
Geral	94	Compressão de Ar
Geral	95	Planta de Tratamento de água
Geral	96	Transportes Internos
Geral	096a	Estradas
Geral	97	Prédio
Geral	98	Outras Plantas
Geral	106	Ferrovia
Geral	107	Porto
Geral	108	Pátio de matéria-prima
Geral	109	Laboratório
Geral	110	Armazém
Geral	111	Refratário

Fonte: Documento Interno (2024).