



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

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS LIMITES E TÉCNICAS DE CONTROLE DE
EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS DE FONTES FIXAS DE UNIDADES
SIDERÚRGICAS INTEGRADAS A COQUE: NORMAS DO BRASIL E DA UNIÃO
EUROPEIA**

Alice Guabiroba Resende

Belo Horizonte

2025

Alice Guabiroba Resende

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS LIMITES E TÉCNICAS DE CONTROLE DE
EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS DE FONTES FIXAS DE UNIDADES
SIDERÚRGICAS INTEGRADAS A COQUE: NORMAS DO BRASIL E DA UNIÃO
EUROPEIA**

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: Profa. Dra. Adriana Alves Pereira Wilken

Belo Horizonte

2025

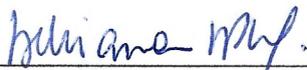
ALICE GUABIROBA RESENDE

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS LIMITES E TÉCNICAS DE CONTROLE DE
EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS DE FONTES FIXAS DE UNIDADES
SIDERÚRGICAS INTEGRADAS A COQUE: NORMAS DO BRASIL E DA UNIÃO
EUROPEIA**

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 04 de julho de 2025

Banca examinadora:



Prof^ª. Dra. Adriana Alves Pereira Wilken – Presidente da Banca Examinadora
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) – Orientadora



Engenheira Ambiental Luciana Soares e Silva
ArcelorMittal Aços Longos Brasil



Prof. Dr. Tiago Borges Ferreira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

RESUMO

A siderurgia ocupa posição de destaque na economia brasileira, mas também se destaca como uma das principais fontes industriais de poluição atmosférica. Nesse contexto, este trabalho realiza uma análise comparativa entre os limites de emissão e as técnicas de controle de poluentes atmosféricos aplicáveis a fontes fixas de usinas siderúrgicas integradas a coque, com base nos documentos de referência do Brasil (Resolução CONAMA nº 382/2006 e o Guia de Melhor Tecnologia Prática Disponível (MTPD) da CETESB) e da União Europeia (Conclusão sobre as Melhores Técnicas Disponíveis (MTD)). A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma análise qualitativa e comparativa, abrangendo as principais etapas do processo siderúrgico: coqueria, sinterização, alto-forno, aciaria LD e laminação a quente. Os resultados evidenciam que, apesar da similaridade entre algumas das técnicas de controle indicadas nos documentos analisados, os limites de emissão definidos pela União Europeia são mais restritivos do que os adotados no Brasil para todas as fontes analisadas. A análise realizada reforça a importância de atualizar o arcabouço legal brasileiro, promovendo uma maior aproximação com os referenciais internacionais, de forma técnica e gradativa. A incorporação das MTD como base para a definição dos limites de emissão pode contribuir para um modelo de produção siderúrgica mais eficiente, competitivo e ambientalmente responsável.

Palavras-chave: Siderurgia. Emissões atmosféricas. Melhores Técnicas Disponíveis. Legislação ambiental. Controle de poluição.

ABSTRACT

The steel industry holds a prominent position in the Brazilian economy but also stands out as one of the main industrial sources of air pollution. In this context, this study conducts a comparative analysis of emission limits and atmospheric pollutant control techniques applicable to stationary sources in integrated coke-based steel plants, based on reference documents from Brazil (CONAMA Resolution No. 382/2006 and the CETESB Guide to Best Practicable Available Technology) and the European Union (Conclusions on Best Available Techniques – BAT). The research was developed through a qualitative and comparative analysis, covering the main stages of the steel production process: coking, sintering, blast furnace, basic oxygen furnace (BOF), and hot rolling. The results show that, despite similarities between some of the control techniques recommended in the analyzed documents, the emission limits established by the European Union are more stringent than those adopted in Brazil for all sources examined. The analysis reinforces the importance of updating the Brazilian legal framework, aiming for closer alignment with international standards in a technical and gradual manner. The incorporation of BAT as a basis for defining emission limits may contribute to a more efficient, competitive, and environmentally responsible steel production model.

Keywords: Steel industry. Air emissions. Best Available Techniques. Environmental legislation. Pollution control.

SUMÁRIO

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 8 |
| 2 | OBJETIVO GERAL | 11 |
| 2.1 | Objetivo geral | 11 |
| 2.2 | Objetivos específicos | 11 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 12 |
| 3.1 | Indústria Siderúrgica | 12 |
| 3.1.1 | <i>Usina Siderúrgica Integrada a Coque</i> | 12 |
| 3.1.2 | <i>Coqueria</i> | 15 |
| 3.1.3 | <i>Sinterização</i> | 16 |
| 3.1.4 | <i>Alto-forno</i> | 18 |
| 3.1.5 | <i>Aciaria Linz-Donawitz (LD)</i> | 19 |
| 3.1.6 | <i>Lingotamento contínuo do aço</i> | 22 |
| 3.1.7 | <i>Laminação de produtos planos e longos</i> | 22 |
| 3.2 | Legislações e Regulamentações da União Europeia | 23 |
| 3.2.1 | <i>Diretiva 2010/75/UE</i> | 23 |
| 3.3 | Legislação Brasileira | 38 |
| 3.3.1 | <i>Resolução CONAMA nº 382/2006</i> | 38 |
| 3.3.2 | <i>Guia de Melhor Tecnologia Prática Disponível</i> | 39 |
| 4 | METODOLOGIA | 47 |
| 4.1 | <i>Delimitação do escopo do estudo</i> | 47 |
| 4.2 | <i>Análise Comparativa</i> | 47 |
| 4.3 | <i>Análise crítica e discussão</i> | 50 |
| 4.4 | <i>Formulação de recomendações</i> | 50 |
| 5 | RESULTADOS | 51 |
| 5.1 | Análise Comparativa por Fontes de Emissões | 51 |
| 5.1.1 | <i>Fontes Fixas da Coqueria</i> | 51 |
| 5.1.2 | <i>Fontes Fixas da Sinterização</i> | 54 |
| 5.1.3 | <i>Fontes Fixas do Alto Forno a Coque</i> | 57 |
| 5.1.4 | <i>Fontes Fixas da Aciaria LD</i> | 59 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.1.5 | <i>Fonte Fixa da Laminação a Quente</i> | 64 |
| 6 | DISCUSSÃO | 68 |
| 7 | CONCLUSÕES | 74 |
| 8 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 76 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Rota de produção de aço em unidades siderúrgicas integradas a coque (alto-forno e LD/BOF)..... | 14 |
|--|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Principais fontes de poluição atmosféricas no processo de siderurgia integrada por tipo de poluente. | 15 |
| Tabela 2 - Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) e Valores de Emissão Associados para Fontes de Emissão da Coqueria segundo as Conclusões MTD da União Europeia (UE) (Decisão de Execução UE 2012/135). | 26 |
| Tabela 3 - Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) e Valores de Emissão Associados para Fontes de Emissão da Sinterização segundo as Conclusões MTD da União Europeia (UE) (Decisão de Execução UE 2012/135). | 28 |
| Tabela 4 - Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) e Valores de Emissão Associados para Fontes de Emissão do Alto-Forno segundo as Conclusões MTD da União Europeia (UE) (Decisão de Execução UE 2012/135). | 31 |
| Tabela 5 - Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) e Valores de Emissão Associados para Fontes de Emissão da Aciaria LD segundo as Conclusões MTD da União Europeia (UE) (Decisão de Execução UE 2012/135). | 33 |
| Tabela 6 - Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) e Valores de Emissão Associados para Fontes de Emissão da Laminação a Quente segundo as Conclusões MTD da União Europeia (UE) (Decisão de Execução (UE) 2022/2110 da Comissão). | 35 |
| Tabela 7 - Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos estabelecidos na Resolução CONAMA nº 382/2006 para fontes fixas de indústrias siderúrgicas integradas a coque. | 39 |
| Tabela 8 - Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis (MTPD) recomendadas pelo Guia da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a redução e controle de emissões atmosféricas de fontes fixas da coqueria. | 41 |
| Tabela 9 - Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis (MTPD) recomendadas pelo Guia da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a redução e controle de emissões atmosféricas de fontes fixas da sinterização. | 43 |
| Tabela 10 - Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis (MTPD) recomendadas pelo Guia da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a redução e controle de emissões atmosféricas de fontes fixas do alto forno. | 44 |
| Tabela 11 - Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis (MTPD) recomendadas pelo Guia da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a redução e controle de emissões atmosféricas de fontes fixas da aciaria LD. | 45 |
| Tabela 12 - Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis (MTPD) recomendadas pelo Guia da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a redução e controle de emissões atmosféricas de fontes fixas da laminação a quente. | 46 |
| Tabela 13 - Aspectos avaliados para cada fonte de emissão atmosférica em usinas siderúrgicas integradas a coque, com base nas exigências normativas e referências técnicas do Brasil e da União Europeia. | 48 |

| | |
|--|----|
| Tabela 14 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para o sistema de despoejamento do desenformamento da coqueria. | 51 |
| Tabela 15 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para a câmara de combustão dos fornos de coque. | 52 |
| Tabela 16 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para o sistema primário de despoejamento da sinterização. | 54 |
| Tabela 17 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para o sistema secundário de despoejamento da sinterização. | 56 |
| Tabela 18 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para a casa de estocagem do alto forno a coque. | 57 |
| Tabela 19 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para a casa ou ala de corrida do alto forno a coque. | 58 |
| Tabela 20 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para o sistema primário de despoejamento (combustão incompleta) da aciaria LD. | 60 |
| Tabela 21 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para o sistema primário de despoejamento (combustão completa) da aciaria LD. | 61 |
| Tabela 22 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para o Sistema Secundário de Despoejamento da Aciaria LD. | 62 |
| Tabela 23 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para o sistema de despoejamento da dessulfuração de gusa da aciaria LD. | 63 |
| Tabela 24 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para os fornos de reauecimento de placas com queima de gases siderúrgicos da laminação a quente. | 64 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- BOF *Basic Oxygen Furnace*
- BAT *Best Available Techniques*
- BATC *Best Available Techniques Conclusion*
- BAT-AELs *Best Available Techniques - Associated Emission Levels*
- BREF Documento de Referência das Melhores Técnicas Disponíveis (*Best Available Techniques Reference Document*)
- CAR Carvão Ativado Regenerado
- CETESB Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
- CH₄ Metano
- CO Monóxido de Carbono
- CO₂ Dióxido de Carbono
- CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente
- COVs Compostos Orgânicos Voláteis
- ESG Ambiental, social e de governança (*Environmental, Social and Governance*)
- FMP Processamento de Metais Ferrosos (*Ferrous Metal Processing*)
- GLP Gás liquefeito de petróleo
- HCL Ácido Clorídrico
- HF Ácido Fluorídrico
- IED *Industrial Emissions Directive*
- LD Linz-Donawitz
- MP Material Particulado
- MTD Melhores Técnicas Disponíveis

MTPD Melhor Tecnologia Prática Disponível

NOC Condições Normais de Operação

NO Óxido de nítrico

NO₂ Dióxido de nitrogênio

O₂ Oxigênio

PCDD/F Dibenzodioxinas e Dibenzofuranos Policlorados

PREFE Plano de Redução de Emissões de Fontes Estacionárias

RCS Redução catalítica seletiva

RNCS Redução não catalítica seletiva

SO₂ Dióxido de carbono

1 INTRODUÇÃO

O setor siderúrgico representa um dos pilares fundamentais da economia brasileira, destacando-se tanto no cenário nacional quanto internacional. Com uma produção de aproximadamente 32 milhões de toneladas de aço bruto em 2023, o Brasil mantém sua posição como nono maior produtor mundial, tendo gerado nesse ano um saldo comercial de US\$ 3,9 bilhões de dólares e mais de 120 mil empregos (Instituto Aço Brasil, 2024).

Apesar de sua relevância econômica e social, o setor enfrenta crescentes desafios relacionados à sustentabilidade e reconhece a importância das questões relacionadas às emissões atmosféricas e seu impacto na qualidade do ar, na saúde humana e no meio ambiente (International Energy Agency, 2020; World Steel Association, 2020). Este aspecto tem ganhado ainda mais notoriedade frente ao atual cenário global, onde regulamentações internacionais e demandas por práticas sustentáveis tornam-se progressivamente mais rigorosas, exigindo do setor uma constante adaptação e aprimoramento de seus processos produtivos, para buscar se tornar mais sustentável, mantendo sua competitividade (International Energy Agency, 2020).

No contexto europeu, a Diretiva de Emissões Industriais (IED - *Industrial Emissions Directive* 2010/75/EU) representa um dos principais instrumentos regulatórios voltados à redução da poluição proveniente de grandes fontes industriais. A IED estabelece, como princípio central, a aplicação obrigatória das Melhores Técnicas Disponíveis (MTD ou BAT, sigla em inglês para *Best Available Techniques*), que são consolidadas em documentos de referência MTD denominados, também, de BREFs (*BAT Reference Documents*). Esses documentos descrevem, com base em evidências técnicas e econômicas, as práticas e tecnologias mais eficazes e viáveis para minimizar os impactos ambientais de setores industrial, dentre os quais inclui-se a siderurgia (Comissão Europeia, 2010).

O documento Conclusões MTD (ou BATC, sigla para *BAT Conclusion*) contém as partes de um documento de referência MTD que estabelece as conclusões sobre as melhores técnicas disponíveis, sua descrição, informações para avaliar sua aplicabilidade, os níveis de emissão associados às melhores técnicas disponíveis, o monitoramento associado, os níveis de consumo associados e, quando apropriado, as medidas relevantes de remediação do local (Comissão Europeia, 2010).

As Conclusões MTD servem como referência para o estabelecimento das condições de licenciamento das instalações cobertas pelo Capítulo II da Diretiva 2010/75/EU, que abrange diversas atividades industriais com elevado potencial poluidor (Comissão Europeia, 2010). No caso do setor siderúrgico, estão incluídas atividades como a produção de coque, a sinterização de minério metálico, a produção de gusa ou aço e o processamento de metais ferrosos por laminação a quente (Comissão Europeia, 2012a; Comissão Europeia, 2022).

Empresas localizadas fora da União Europeia (UE), como as siderúrgicas brasileiras, são cada vez mais incentivadas a atender a esses parâmetros, tanto para manter sua competitividade em mercados internacionais quanto para responder à crescente valorização de práticas ESG (*Environmental, Social and Governance*). Nesse sentido, alinhar-se às exigências europeias torna-se não apenas uma vantagem estratégica, mas também uma medida de antecipação a possíveis exigências futuras no mercado interno (International Energy Agency, 2020).

No Brasil, os valores limites de emissões atmosféricas de fontes fixas são regulamentados, em âmbito federal, pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 382, de 26 de dezembro de 2006, que estabelece os limites máximos permitidos para diferentes poluentes (Brasil, 2007). Apesar de a Lei nº 14850/2024 mencionar que para controle das fontes poluidoras a fixação de limites máximos de emissão levará em conta, as melhores práticas e tecnologias disponíveis, acessíveis e já desenvolvidas em escala que permita sua aplicação prática, em âmbito federal, não se tem no Brasil um documento equivalente às Conclusões MTD. Porém, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) elaborou o Guia de Melhor Tecnologia Prática Disponível (MTPD), como instrumento de apoio à implementação do Plano de Redução de Emissões de Fontes Estacionárias (PREFE), instituído pelo Decreto Estadual nº 59.113/2013 (CETESB, 2017; São Paulo, 2013). O Guia MTPD visa estabelecer as melhores tecnologias práticas disponíveis para controle de emissões atmosféricas em diversas atividades industriais, das quais incluem as atividades de siderurgia e metalurgia, além de orientar a adoção de tecnologias de controle e melhorias de processo, com o intuito de atender padrões de qualidade do ar e limites legais de emissão.

Diante desse panorama, o presente trabalho visa realizar uma análise comparativa dos limites e técnicas de controle de emissões de poluentes atmosféricos previstos nos documentos de

referência no contexto europeu e brasileiro, aplicáveis ao setor siderúrgico, especificamente a uma unidade siderúrgica integrada a coque. Desta forma, busca-se identificar lacunas regulatórias, desafios técnicos e barreiras à adoção de padrões internacionais, de modo a contribuir para o desenvolvimento de estratégias que conciliem competitividade industrial com a proteção ambiental eficaz.

2 OBJETIVO GERAL

2.1 Objetivo geral

Analisar comparativamente os limites e técnicas de controle de emissões de poluentes atmosféricos de fontes fixas de usinas siderúrgicas integradas a coque, indicados nos documentos de referência do Brasil e da UE.

2.2 Objetivos específicos

- Comparar os limites de emissões de poluentes;
- Comparar as técnicas recomendadas para controle e redução de emissões atmosféricas;
- Investigar os fatores que podem justificar as diferenças observadas nos limites de emissões atmosféricas e nas técnicas de controle e redução de emissões;
- Propor recomendações para aprimoramento dos requisitos segundo as exigências mais restritivas, visando maior alinhamento entre os padrões de sustentabilidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Indústria Siderúrgica

A metalurgia compreende um conjunto de técnicas que possibilitam a extração e a manipulação de metais e a produção de ligas metálicas. Essa atividade é responsável por converter minérios metálicos, tanto ferrosos quanto não ferrosos, em produtos metalúrgicos e insumos intermediários do processo. Dentro desse segmento, destaca-se a siderurgia, que é o ramo da metalurgia voltado à produção e ao tratamento de aço, fabricando produtos como semiacabados, laminados, relaminados, trefilados e tarugos - utilizados como matéria-prima nos processos de laminação (CETESB, 2017).

Dependendo da estrutura de produção, as indústrias siderúrgicas podem ser divididas em dois segmentos: usinas integradas e usinas semi-integradas (Carvalho; Mesquita; Araújo, 2015).

A Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006 define usinas siderúrgicas integradas como:

[...] usinas siderúrgicas que utilizam o processo de redução do minério de ferro, a partir de uma carga constituída por minério de ferro granulado e/ou de aglomerados de finos de minério de ferro, em forma de sínter ou pelotas e de um agente redutor-coque ou carvão vegetal - para a obtenção do ferro gusa líquido que, juntamente com pequenas quantidades de sucata, é submetido ao processo de refino para a produção do aço em aciaria (Brasil, 2007, anexo XIII, item 2, alínea h.1).

Esta mesma resolução define usinas siderúrgicas semi-integradas como “usinas siderúrgicas que utilizam para obtenção do aço o processo de refino, em fornos elétricos a arco, de uma carga constituída por sucata e/ou ferro esponja e/ou ferro gusa” (Brasil, 2007, anexo XIII, item 2, alínea i.1).

3.1.1 Usina Siderúrgica Integrada a Coque

De acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (Brasil, 2017), a rota integrada de produção de ferro e aço pode apresentar diferentes configurações tecnológicas. Nesse cenário, destacam-se três principais rotas produtivas: (i) a redução em alto-forno com conversão do ferro-gusa em aço por meio de conversor a oxigênio (rota BF-BOF), (ii) a fusão redutora

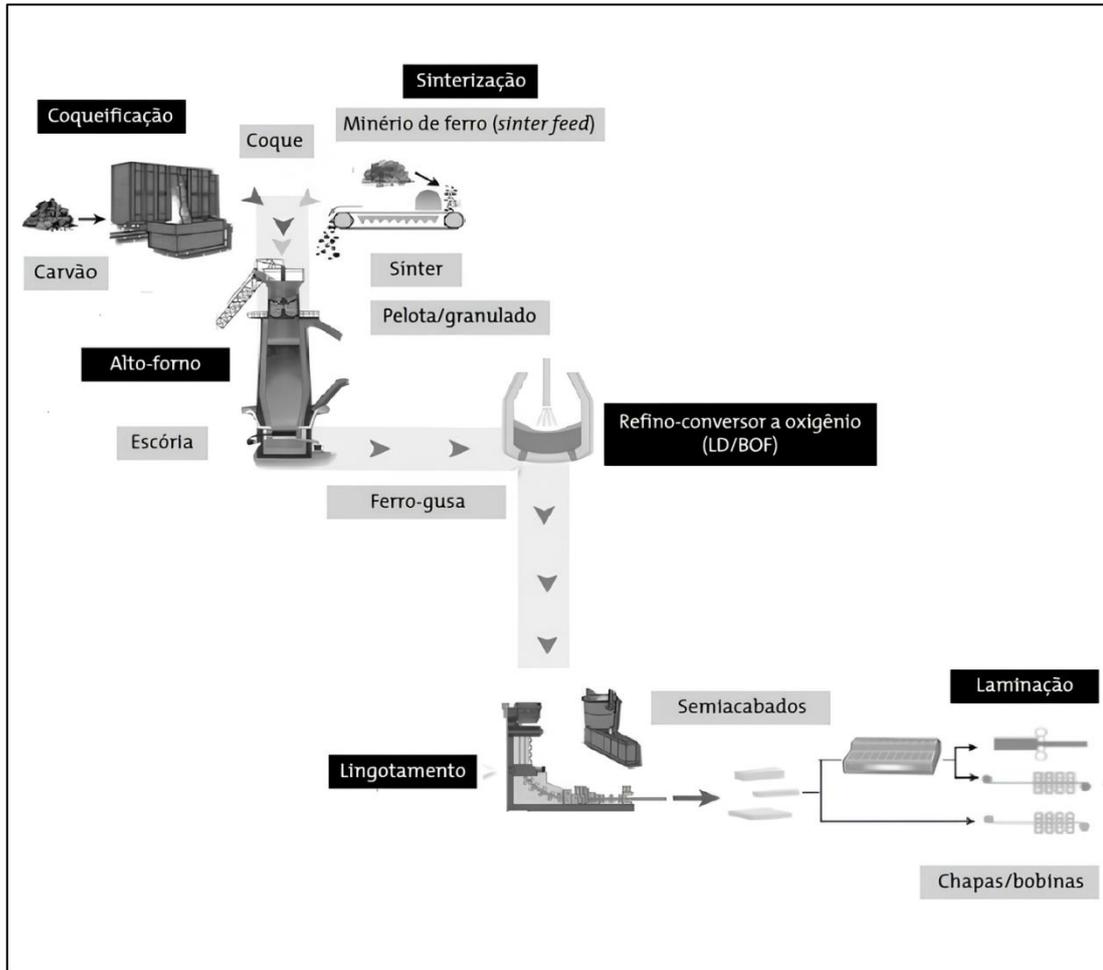
seguida da conversão a oxigênio, e (iii) a redução direta com posterior produção de aço em forno elétrico a arco.

Segundo dados da World Steel Association (2024), aproximadamente 71% do aço bruto produzido globalmente é obtido por meio da rota BF-BOF, evidenciando sua predominância no setor siderúrgico.

Dentro da rota BF-BOF, contudo, há ainda subdivisões tecnológicas. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2009), essa rota pode ser classificada em duas variantes: uma 100% integrada com coque próprio, e outra que utiliza coque adquirido de terceiros.

Conforme representado na Figura 1, nas usinas integradas com produção de coque, o processo tem início com a alimentação do alto-forno pela parte superior, utilizando minério de ferro, coque e fundentes. Simultaneamente, ar aquecido é injetado pelas ventaneiras na base do forno, promovendo a fusão da carga sólida e iniciando a redução do minério (Carvalho; Mesquita; Araújo, 2015).

Figura 1 - Rota de produção de aço em unidades siderúrgicas integradas a coque (alto-forno e LD/BOF).



Fonte: Carvalho; Mesquita e Araújo (2015).

Conforme apresentado na Tabela 1, poluentes atmosféricos são emitidos em quase todos os processos de uma usina integrada a coque.

Tabela 1 - Principais fontes de poluição atmosféricas no processo de siderurgia integrada por tipo de poluente.

| Processos | Fonte de Emissão | Poluente | | | |
|--------------|--|---------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| | | Material Particulado (MP) | Óxidos de Enxofre (SOx) | Óxidos de Nitrogênio (NOx) | Compostos Orgânicos Voláteis (COV) |
| Coqueria | Sistema de Despoeiramento | * | - | - | - |
| | Fornos de coque | * | * | * | * |
| Sinterização | Sistema Primário de Despoeiramento | * | * | * | * |
| | Sistema Secundário de Despoeiramento | * | - | - | - |
| Alto-forno | Sistema Secundário de Despoeiramento da Casa de Estocagem | * | - | - | - |
| | Sistema Secundário de Despoeiramento da Casa ou Ala de Corrida | * | - | - | - |
| Aciaria | Sistema de Despoeiramento | * | - | - | - |
| | Forno | * | * | * | * |
| Laminação | Fornos de reaquecimento | * | * | * | * |

* poluente a ser considerado

Fonte: Adaptado de CETESB (2017).

3.1.2 Coqueria

Nas usinas siderúrgicas, o processo de produção do aço começa com a etapa de recebimento, armazenamento e preparo das matérias-primas. Na produção de ferro primário, em usinas integradas, as principais matérias-primas empregadas incluem minérios de ferro, combustíveis e redutores, além de fundentes (Bolota, 2024).

O redutor mais usado é o coque metalúrgico, que é um produto obtido por meio da destilação do carvão mineral. Dessa forma, ainda na etapa de preparação das matérias-primas empregadas no processo siderúrgico, tem-se o processo de coqueificação, onde a mistura de carvões é direcionada à coqueria dando origem ao "coque" (Bolota, 2024; Mourão, 2007).

O processo de produção de coque ocorre em fornos verticais, estreitos e altos, aquecidos indiretamente por meio das paredes laterais construídas com tijolos de sílica. Essas paredes recebem calor das câmaras de combustão localizadas entre fornos adjacentes. Nessas câmaras,

que são compartimentos destinados à queima de gases siderúrgicos (geralmente uma mistura de gás de coqueria e gás de alto-forno), ocorre a combustão a temperaturas entre 1.000 e 1.100 °C (Brasil, 2007; Bolota, 2024). O calor gerado é transferido de forma perpendicular das paredes para o interior do forno, promovendo a coqueificação da mistura de carvões carregada pelo topo do forno (Bolota, 2024).

Durante o processo de coqueificação, o carvão passa por três etapas principais: evaporação, plastificação e ressolidificação. Após estas etapas são formadas duas frentes plásticas que se deslocam das paredes aquecidas em direção ao centro do forno. Ao final do ciclo, forma-se o coque, que é um material sólido, poroso e rico em carbono (Bolota, 2024).

A remoção do coque ocorre de forma mecânica, utilizando uma máquina desenformadora, que o empurra lateralmente até que caia em um vagão do carro apagador, onde será resfriado (Bolota, 2024). Durante essa etapa, é gerado material particulado (MP), o qual é captado e tratado por um sistema de despoeiramento específico para o desenformamento da coqueria, com o objetivo de minimizar as emissões atmosféricas (Brasil, 2007).

A coqueificação, portanto, envolve a destilação seca do carvão a altas temperaturas em condições anaeróbicas. Emite principalmente dióxido de enxofre (SO₂) e MP devido à combustão do gás residual rico em compostos de enxofre e à liberação de poeira durante o manuseio de coque. A temperatura na câmara de combustão pode atingir até 1300 °C, intensificando a oxidação do enxofre contido no combustível (Yu *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2015; Tabela 1).

3.1.3 Sinterização

Para atender às exigências técnicas e econômicas do setor siderúrgico, é fundamental reduzir o teor de ganga (fração mineral indesejada remanescente após o beneficiamento) presente no minério de ferro antes de seu encaminhamento às usinas. Os minérios classificados como *pellet feed* e *sinter feed* são obtidos por meio de operações de britagem e moagem que promovem a liberação do ferro, elevando sua concentração metálica e, simultaneamente, diminuindo o conteúdo de ganga. Esses processamentos resultam em materiais de granulometria fina, os quais, devido às suas características físicas, necessitam de processos de aglomeração

(pelotização e sinterização) para tornarem-se adequados ao uso em altos-fornos, sob a forma de pelotas ou sinter (Bolota, 2024). Atualmente, o *sinter feed* é a forma de minério de ferro mais amplamente empregada pelas usinas siderúrgicas (CSN, 2024).

Dessa forma, o processo de sinterização consiste na conversão de matérias-primas finas, como minério de ferro, brisa de coque, calcário, carepa de laminação e pó de combustão, em um produto aglomerado - o sinter - com tamanho apropriado para alimentação dos altos-fornos. Essas matérias-primas são umedecidas para formar uma mistura coesa, que é distribuída sobre uma grelha metálica contínua e móvel, conhecida como fio de sinterização. Na extremidade inicial dessa grelha, um queimador inflama o coque presente na mistura. A partir desse ponto, a combustão torna-se autossustentável, gerando calor suficiente, entre 1300 °C e 1480 °C, para promover a fusão superficial e a aglomeração do material (US EPA, 2008).

Durante o processo, caixas de vento localizadas na parte inferior do equipamento aspiram os gases quentes através do leito de material. Esses gases são então direcionados a um duto comum que os conduz a dispositivos de limpeza (US EPA, 2008). Esse sistema de exaustão compõe o sistema primário de despoeiramento da sinterização, cuja função é captar o MP gerado na máquina de produção de sinter (Brasil, 2007).

Na etapa final da linha de sinterização, o sinter parcialmente fundido é descarregado, triturado e peneirado. O material restante é resfriado, seja ao ar livre ou em resfriadores circulares que utilizam sprays de água ou ventilação forçada. Após o resfriamento, o sinter é novamente triturado e peneirado; separando-se os finos para reciclagem e o produto final, com granulometria adequada, é encaminhado para os altos-fornos (US EPA, 2008).

As etapas de peneiramento, britagem e transporte de matérias-primas e sinter geram MP adicional, que é controlado por meio do sistema secundário de despoeiramento da sinterização, responsável pela captação e tratamento dessas emissões (Brasil, 2007).

A aglomeração de partículas finas de minério de ferro com fundentes e combustíveis sólidos, no processo de sinterização, é responsável por cerca de 72% das emissões de SO₂ no processo siderúrgico, geradas pela oxidação dos compostos sulfurados presentes no minério e no

combustível utilizado na zona de combustão do leito sinterizado. A sinterização contribui significativamente, também, para as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), formados pela pirólise e combustão do nitrogênio contido nos combustíveis sólidos (Yu *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2019; Tabela 1).

As matérias-primas são transportadas dos pátios de estocagem ou das etapas anteriores (coqueria e sinterização) para a casa de silos (*stockhouse*) através de correias transportadoras, onde são armazenadas (Bolota, 2024).

3.1.4 Alto-forno

O alto-forno é um equipamento essencial no processo siderúrgico, responsável pela produção do ferro-gusa em estado líquido a uma temperatura aproximada de 1500 °C (Bolota, 2024). O ferro-gusa é produzido em altos-fornos por meio da redução de materiais contendo ferro com um gás quente (US EPA, 2008).

O ferro-gusa líquido é composto principalmente por ferro (cerca de 94%) e carbono (aproximadamente 4,5%), além de outros elementos em menores proporções, como silício, manganês, titânio, fósforo e enxofre (Bolota, 2024).

O processo de redução de minério de ferro em altos-fornos começa com a transferência das matérias-primas (como sinter, coque e minério) para a casa de silos, onde são peneiradas e pesadas (Bolota, 2024). Durante essas operações, há geração de MP, o qual deve ser controlado por meio do sistema de despoeiramento da casa de estocagem do alto-forno a coque, responsável pela captação e tratamento dos particulados gerados nas atividades de transferência, carregamento e descarregamento dos silos (Brasil, 2007).

Em seguida, as matérias-primas são transportadas para o topo do alto-forno, tendo em vista que o grande forno refratário revestido é carregado através de sua parte superior com ferro na forma de minério, pelotas e/ou sinterização; fundentes como calcário, dolomita e sinterização; e coque para combustível. Os óxidos de ferro, o coque e os fundentes reagem com ar de explosão para formar ferro fundido reduzido, monóxido de carbono (CO) e escória (US EPA, 2008).

O gás de subproduto do alto-forno, que é coletado da parte superior do forno, contém CO e MP. Devido ao seu alto teor de CO, o gás de alto-forno tem um baixo valor de aquecimento e é usado como combustível na usina siderúrgica (nos laminadores, por exemplo). No entanto, antes de poder ser oxidado com eficiência, o gás precisa ser limpo de partículas (US EPA, 2008).

Na parte inferior do forno ocorre a separação do ferro-gusa e da escória por diferença de densidade no canal principal da casa de corrida. O ferro-gusa é escoado e direcionado a carros torpedos para transporte até a aciaria, onde será convertido em aço. A escória, por sua vez, pode ser drenada em potes ou resfriada por jatos de água de alta pressão, transformando-se em material granulado, muitas vezes comercializado (Bolota, 2024). Durante essa etapa, é necessária a atuação do sistema de despoeiramento da casa ou ala de corrida dos altos-fornos a coque ou a carvão vegetal, responsável por captar e tratar o material particulado gerado durante o vazamento do gusa e o carregamento dos carros torpedos (Brasil, 2007).

No alto-forno há emissões significativas de SO₂ e MP. Essas emissões decorrem, em grande parte, da combustão dos componentes sulfurados presentes no gás de alto-forno, em temperaturas que podem chegar a 1400 °C. Nessa etapa do processo siderúrgico, as emissões de óxidos de nitrogênio são predominantemente, causadas pelas altas temperaturas envolvidas no processo (Yu *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2019; Tabela 1).

O ferro-gusa será utilizado na aciaria para a produção de aço por meio de um processo de refino destinado a ajustar a sua composição química (Bolota, 2024).

3.1.5 Aciaria Linz-Donawitz (LD)

A dessulfurização do ferro-gusa pode ser realizada antes de sua introdução no forno de produção de aço, por meio da adição de reagentes que reagem com o enxofre, formando uma escória removível por escumadeira (US EPA, 2008).

Os reagentes mais utilizados incluem o carbetto de cálcio (CaC₂), o carbonato de cálcio (CaCO₃) e grânulos de magnésio revestidos com sal, sendo geralmente injetados no metal líquido com auxílio de lança e nitrogênio sob alta pressão (US EPA, 2008). Durante essa etapa, há geração

de emissões atmosféricas, que são controladas por meio do sistema de despoeiramento da dessulfuração do gusa, responsável pela captação e tratamento do MP (Brasil, 2007).

A aciaria é o setor da usina siderúrgica onde o ferro-gusa é refinado para obtenção do aço, que é uma liga metálica que geralmente contém entre 0,002% e 2,0% de carbono em peso, além de outros elementos de liga em diferentes proporções (Mourão, 2007).

Atualmente, o método predominante nas usinas integradas para converter o ferro-gusa em aço é o processo a oxigênio, também conhecido como processo *Linz-Donawitz* (LD) ou *Basic Oxygen Furnace* (BOF) (Mourão, 2007). Nesse método, o oxigênio reage com o carbono e outras impurezas para removê-las do metal. As reações são exotérmicas, ou seja, nenhuma fonte externa de calor é necessária para derreter a sucata e elevar a temperatura do metal até a faixa desejada para o rosqueamento (US EPA, 2008).

O ciclo de refino no conversor a oxigênio inicia-se com o carregamento da carga sólida, composta por sucata e ferro-gusa sólido, inserida com o conversor inclinado a aproximadamente 60°. Em seguida, o equipamento é posicionado verticalmente e oscilado para o assentamento da carga, antes da adição do ferro-gusa líquido (Mourão, 2007). Esse metal líquido é transportado em painéis especiais do tipo “pelicano”, onde é pesado, aferido em temperatura e amostrado antes de ser transferido ao conversor por pontes rolantes (Mourão, 2007; Bolota, 2024).

Após o carregamento do gusa líquido, o conversor é novamente posicionado na vertical para o início do sopro de oxigênio, realizado por uma lança resfriada a água. A duração do sopro é determinada por parâmetros como vazão de oxigênio, análise visual da chama, volume de gás injetado, taxa de descarburização e, em unidades com sublança, por medições automatizadas de temperatura e composição química (Mourão, 2007; Bolota, 2024). Em aciarias sem sublança, o controle é manual, com interrupção do sopro e amostragem subsequente (Bolota, 2024).

Durante o sopro, são adicionados fundentes como cal e dolomita, cuja obtenção também gera particulados controlados por meio do sistema de despoeiramento dos fornos de cal (Brasil, 2007).

O controle das emissões atmosféricas geradas durante o sopro é realizado por dois sistemas complementares: o sistema de despoeiramento primário da aciaria LD, responsável pela exaustão e tratamento dos gases emitidos diretamente pelo conversor; e o sistema de despoeiramento secundário da aciaria LD, voltado à captação do MP gerado durante o basculamento e pesagem do gusa, retirada de escória, carregamento de carga metálica e vazamento do aço (Brasil, 2007).

Encerrado o sopro, o aço líquido é transferido para panelas, passando por desoxidação com alumínio e/ou silício, e pela adição de ferroligas que conferem propriedades específicas ao material. A escória é retirada com o basculamento do conversor e armazenada em pote apropriado. O equipamento, então, retorna à posição inicial, reiniciando o ciclo, enquanto o aço segue para o refino secundário (Bolota, 2024; Mourão, 2007).

A conversão do ferro-gusa também é uma etapa importante no que diz respeito às emissões de poluentes atmosféricos. Durante essa etapa, o sopro de oxigênio através do ferro-gusa gera NO_x e MP. Os NO_x são formados devido à reação do oxigênio dissolvido com o nitrogênio atmosférico em alta temperatura, enquanto o MP inclui óxidos metálicos formados a partir das reações químicas durante a oxidação (Yu *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2019; Tabela 1).

Na fabricação de aços, as principais impurezas a serem removidas incluem oxigênio, enxofre, nitrogênio, hidrogênio e fósforo (Bolota, 2024). Essas impurezas podem formar compostos conhecidos como inclusões, como óxidos, sulfetos e nitretos. Na maioria dos casos, as inclusões são prejudiciais às propriedades mecânicas e características desejadas do aço, podendo ocasionar redução da plasticidade, diminuição da tenacidade, formação de trincas e ocorrência de defeitos superficiais. Em determinadas situações, inclusões controladas podem ser benéficas, contribuindo para a usinabilidade, dureza e propriedades direcionais do aço (Mourão, 2007).

O refino secundário, também conhecido como metalurgia de panela, é realizado fora do conversor e permite o ajuste da composição química e o controle das inclusões. A panela atua como reator metalúrgico e, ao final do processo, o aço líquido é transferido para o lingotamento contínuo por meio de uma abertura inferior, controlada por placas deslizantes (Bolota, 2024).

3.1.6 *Lingotamento contínuo do aço*

O lingotamento contínuo é a etapa final da aciaria em que o aço, ainda em estado líquido, é solidificado em formatos específicos para posterior processamento na cadeia siderúrgica (Mourão, 2007). O processo se inicia com o vazamento do aço líquido a partir de uma panela, posicionada em uma torre metálica, até um distribuidor revestido com materiais refratários, que atua como reservatório intermediário e promove a remoção de inclusões não metálicas por flotação (Bolota, 2024).

O aço segue então para um molde de cobre resfriado internamente por água, onde ocorre a formação da pele solidificada, essencial para conter o metal líquido. A eficiência dessa fase depende do movimento oscilatório do molde e da aplicação de lubrificante, que asseguram a integridade da superfície solidificada (Bolota, 2024).

À medida que o veio metálico avança pela máquina de lingotamento, rolos de suporte e chuveiros de água garantem a solidificação completa do material, evitando deformações como o abaulamento. No final do processo, as peças produzidas (como placas, blocos e tarugos) são direcionadas ao fluxo de produção apropriado para cada tipo de aço fabricado. Essa etapa finaliza o processo de lingotamento contínuo, consolidando sua importância na produção de materiais de alta qualidade e eficiência dentro da cadeia siderúrgica (Bolota, 2024).

3.1.7 *Laminação de produtos planos e longos*

A laminação a quente é um processo industrial utilizado para modificar as dimensões, a forma e as propriedades metalúrgicas do aço por meio de compressão repetida do metal aquecido entre cilindros. Durante essa operação, o aço é submetido a temperaturas elevadas, que variam entre 1050 °C e 1300 °C, o que permite sua deformação plástica eficiente (CETESB, 2017).

O aço submetido ao processo de laminação a quente pode ter diferentes formatos e perfis (como lingotes vazados, brames, blumes, biletas e perfis estampados), dependendo do produto final desejado. Os produtos obtidos por laminação a quente são comumente classificados em duas categorias principais: produtos planos e produtos longos, definidos com base em sua geometria (CETESB, 2017).

O processamento da laminação a quente envolve uma série de etapas integradas. Inicialmente, realiza-se o condicionamento do material de entrada, o que pode incluir operações como chanfragem e retificação. Em seguida, o aço é aquecido à temperatura de laminação nos chamados fornos de reaquecimento, equipamentos destinados ao aquecimento dos produtos a serem laminados, cujas demandas térmicas são supridas principalmente pela queima de gases siderúrgicos. Estes gases são subprodutos gasosos gerados nas unidades de coqueria (gás de coqueria), alto-forno (gás de alto-forno) e aciaria (gás de aciaria), amplamente utilizados como combustíveis em diversas etapas da siderurgia (Brasil, 2007; CETESB, 2017).

Após o aquecimento, ocorre a remoção da calamina, uma camada de óxidos que se forma na superfície do aço. Essa remoção é essencial para garantir melhor qualidade superficial ao produto final. Em seguida, realiza-se a laminação propriamente dita, também chamada de desbaste, durante a qual o material sofre reduções sucessivas em sua espessura ou largura até atingir as dimensões e propriedades definidas. Por fim, o produto laminado passa por uma fase de acabamento, que pode incluir rebarbação, cortes longitudinais ou cortes transversais, conforme os requisitos do cliente e as especificações técnicas do produto (CETESB, 2017).

Na etapa de laminação, que utiliza gás de alto-forno como combustível em fornos de reaquecimento, ocorrem emissões significativas de SO₂ e NO_x. O SO₂ provém da combustão dos compostos sulfurados presentes no gás de alto-forno, enquanto os NO_x são gerados pela combustão a altas temperaturas características dessa etapa (Yu *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2015; Tabela 1).

3.2 Legislações e Regulamentações da União Europeia

3.2.1 Diretiva 2010/75/UE

A Diretiva de Emissões Industriais é o principal instrumento de regulação das emissões poluentes para o ar, a água e o solo provenientes de mais de 52.000 das maiores instalações industriais da UE. Conforme mencionado anteriormente, esta diretiva condiciona a concessão de licenças para instalações industriais ao cumprimento das MTD, o que levou as indústrias em causa a reduzir progressivamente as emissões e contribuiu para condições de concorrência equitativas (Comissão Europeia, 2021).

Um dos pilares da Diretiva 2010/75/UE é a exigência de que as conclusões sobre as MTD constituam a referência principal para o estabelecimento das condições de licenciamento. Nessa perspectiva, as emissões atmosféricas devem obedecer aos valores-limite de emissão associados às MTD (VEA-MTD ou BAT-AELs, sigla em inglês para *Best Available Techniques - Associated Emission Levels*), os quais correspondem a faixas de desempenho ambiental tecnicamente alcançáveis sob condições normais de operação (*Normal Operating Conditions – NOC*). Esses limites são expressos como médias calculadas durante períodos determinados e em condições de referência específicas, refletindo o desempenho que pode ser atingido quando as técnicas recomendadas são adequadamente implementadas (Comissão Europeia, 2010).

Vale ressaltar que, segundo a Decisão de Execução da Comissão Europeia de 10 de fevereiro de 2012 “a lista de técnicas descritas nas conclusões MTD não é obrigatória nem exaustiva” (Comissão Europeia, 2012a). Isso significa que as indústrias não são obrigadas a adotar exatamente as técnicas listadas nos documentos de referência europeus, desde que utilizem métodos capazes de atingir níveis de desempenho ambiental no mínimo equivalentes aos estabelecidos pelas MTD (Comissão Europeia, 2012a). Dessa forma, a normativa evidência que a obrigação imposta pela Diretiva de Emissões Industriais é de resultado e não de meio, permitindo flexibilidade tecnológica e promovendo a inovação, desde que os objetivos de proteção ambiental sejam efetivamente alcançados.

O não atendimento dos VEA-MTD somente pode ser admitido em situações excepcionais, mediante justificativa técnica formal que comprove a inviabilidade do atendimento aos valores estabelecidos. Tal justificativa deve ser submetida à autoridade competente, que poderá autorizar a flexibilização, desde que devidamente fundamentada (Comissão Europeia, 2010).

No contexto da Diretiva 2010/75/UE, as conclusões sobre as MTD para a Produção de Ferro e Aço foram publicadas como documento de referência específico para as unidades industriais envolvidas em atividades como a produção de gusa, aço bruto e operações associadas de preparação e tratamento de matérias-primas. Essas conclusões definem níveis de emissão associados às melhores técnicas, parâmetros de monitoramento e medidas de gestão ambiental aplicáveis às diferentes etapas do processo produtivo, incluindo alto fornos, convertedores, sistemas de sinterização e coquerias (Comissão Europeia, 2012a).

As MTD e os VEA-MTD, definidos nas Conclusões MTD aplicáveis à produção de ferro e aço, referentes ao controle e à redução das emissões atmosféricas de fontes fixas nas instalações que compõem a rota integrada a coque, incluem coqueria, sinterização, alto-forno e aciaria LD. As informações estão apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 2, 3, 4 e 5.

Os Além disso, as Conclusões MTD para o Processamento de Metais Ferrosos (FMP) são igualmente aplicáveis, abrangendo as etapas posteriores à produção de aço, em que produtos semiacabados, como lingotes, placas, blocos e tarugos, passam por processos de laminação a quente ou a frio para dar origem a uma variedade de produtos de modo a garantir que tais atividades sigam padrões ambientais rigorosos (Comissão Europeia, 2022).

As MTD e os VEA-MTD definidos na Conclusão MTD para o processamento de metais ferrosos, aplicáveis à laminação a quente estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 2 - Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) e Valores de Emissão Associados para Fontes de Emissão da Coqueria segundo as Conclusões MTD da União Europeia (UE) (Decisão de Execução UE 2012/135).

| Fontes de Emissão | Parâmetro | Número da MTD no documento | MTD – UE | Valor de Emissão Associado às Melhores Técnicas Disponíveis (VEA-MTD) (mg/Nm ³) | %O ₂ |
|--|--|----------------------------|---|---|-----------------|
| Moagem de Carvão (<i>preparação do carvão, incluindo trituração, moagem, pulverização e seleção</i>) | Material Particulado (MP) | 42 | Utilizar uma das seguintes técnicas ou várias em combinação: I. Edificação e/ou isolamento dos dispositivos (triturador, pulverizador, crivos). II. Extração e utilização eficaz de sistemas subsequentes de despoeiramento a seco. | < 10–20 | - |
| Armazenagem e o manuseamento de carvão pulverizado | MP | 43 | Utilização de uma extração eficaz e subsequente despoeiramento. | < 10-20 | - |
| Sistemas de carregamento de carvão com tratamento no terreno dos gases extraídos | MP | 44 | Se os gases forem extraídos e tratados fora do forno de coque, o método preferencial é o carregamento com tratamento dos gases extraídos em sistema externo. O tratamento deve consistir em uma extração eficiente das emissões, seguida de combustão para reduzir os compostos orgânicos, além da utilização de um filtro de mangas para reduzir o material particulado. | < 50 | - |
| Teor de enxofre do gás de forno de coque | Sulfureto de hidrogénio (H ₂ S) | 48 | Redução do teor de enxofre do gás de coqueria utilizando a técnica de dessulfuração por sistemas de absorção. | <300 - 1000* | - |
| | | | Redução do teor de enxofre do gás de coqueria utilizando a técnica de dessulfuração oxidativa por via úmida. | <100 | - |
| Aquecimento do forno de coque | MP | 49 | Redução das emissões utilizando as seguintes técnicas: I. Prevenção de fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento através da operação regular do forno de coque; II. Reparação das fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento (aplicável apenas em instalações existentes). | < 1-20 | 5% |

| Fontes de Emissão | Parâmetro | Número da MTD no documento | MTD – UE | Valor de Emissão Associado às Melhores Técnicas Disponíveis (VEA-MTD) (mg/Nm ³) | % O ₂ |
|-------------------------------|--|----------------------------|--|---|------------------|
| Aquecimento do forno de coque | Óxidos de enxofre (SOx) - expresso como SO ₂ | 49 | Redução das emissões utilizando as seguintes técnicas: I. Prevenção de fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento através da operação regular do forno de coque; II. Reparação das fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento (aplicável apenas em instalações existentes); IV. Utilização de gases de processo dessulfurados do gás de coqueria. | < 200-500 | 5% |
| Aquecimento do forno de coque | Óxidos de nitrogênio (NOx) - expresso como NO ₂ | 49 | Redução das emissões utilizando as seguintes técnicas: I. Prevenção de fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento através da operação regular do forno de coque; II. Reparação das fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento (aplicável apenas em instalações existentes); | < 350-500* | 5% |
| | | | III. Incorporação de técnicas com baixas emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) na construção de novas baterias, como por exemplo a combustão por etapas e a utilização de tijolos mais finos e material refratário com melhor condutividade térmica (aplicável apenas em novas instalações). | 500-650** | 5% |
| Desenformamento de coque | MP | 50 | Redução das emissões de partículas utilizando as seguintes técnicas: I. Extração através de uma máquina de transferência de coque integrada equipada com uma cobertura; | < 10 | - |
| | | | II. Utilização de tratamento no terreno do gás extraído com um filtro de mangas; III. Utilização de um vagão de coque móvel ou de um ponto. | | |
| | | | Redução das emissões de partículas utilizando as seguintes técnicas: I. Extração através de uma máquina de transferência de coque integrada equipada com uma cobertura; II. Utilização de tratamento no terreno do gás extraído com outro sistema de redução; III. Utilização de um vagão de coque móvel ou de um ponto. | < 20 | - |

* Sendo os valores mais elevados associados a uma temperatura ambiente superior e os valores mais baixos associados a uma temperatura ambiente inferior.

** Para novas instalações ou instalações que tenham sido substancialmente remodeladas (com menos de 10 anos).

*** Para instalações mais velhas com baterias em boas condições e que incorporem técnicas de baixas emissões de NOx.

Fonte: Comissão Europeia (2012a).

Tabela 3 – Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) e Valores de Emissão Associados para Fontes de Emissão da Sinterização segundo as Conclusões MTD da União Europeia (EU) (Decisão de Execução EU 2012/135).

| Fontes de Emissão | Parâmetro | Número da MTD no documento | MTD – UE | Valor de Emissão Associado às Melhores Técnicas Disponíveis (VEA-MTD) (mg/Nm ³) | %O ₂ |
|------------------------------------|--|----------------------------|--|---|-----------------|
| Sistema Primário de Despoeiramento | Material Particulado (MP) | 20 | Utilização de filtro de mangas. | < 1 – 15 mg/Nm ³ | - |
| | | | Utilização de um sistema de precipitação eletrostática avançada sempre que os filtros de mangas não sejam aplicáveis. | < 20 – 40 mg/Nm ³ | - |
| Sistema Primário de Despoeiramento | Mercurio (Hg) | 21 | Seleção de matérias-primas com baixo teor de mercúrio ou tratar os gases residuais em combinação com a injeção de carvão ativo ou coque de lenhite ativado. | < 0,03 – 0,05 mg/Nm ³ | - |
| Sistema Primário de Despoeiramento | Óxidos de enxofre (SO _x) - expresso como SO ₂ | 22 | Utilização de uma das seguintes técnicas ou várias em combinação: I. Diminuição da entrada de enxofre no processo utilizando pó de coque com baixo teor de enxofre II. Diminuição da entrada de enxofre no processo através da minimização do consumo de pó de coque III. Diminuição da entrada de enxofre no processo utilizando minério de ferro com baixo teor de enxofre IV. Injeção de agentes de adsorção adequados na conduta de gases residuais da linha de sinterização antes do despoeiramento por filtro de manga | < 350 – 500 mg/Nm ³ | - |
| | | | Utilização da técnica: V. Processo de dessulfuração úmida ou de carvão ativado regenerado (CAR) (tomando em especial atenção os pré-requisitos para a respetiva aplicação) | < 100 mg/Nm ³ | - |

| Fontes de Emissão | Parâmetro | Número da MTD no documento | MTD – UE | Valor de Emissão Associado às Melhores Técnicas Disponíveis (VEA-MTD) (mg/Nm ³) | %O ₂ |
|--|--|----------------------------|---|---|-----------------|
| Sistema Primário de Despoeiramento | Óxidos de nitrogênio (NOx) - expresso como NO ₂ | 23 | Utilização de uma das seguintes técnicas ou várias em combinação: I. Medidas integradas nos processos, entre as quais: i. recirculação de gases residuais ii. outras medidas primárias, como a utilização de antracite ou a utilização de queimadores com baixas emissões de NOx para ignição. | < 350 – 500 mg/Nm ³ | 15% |
| | | | Utilização de uma das seguintes técnicas ou várias em combinação: II. Técnicas de fim-de-linha, entre as quais: i. processo de carvão ativado regenerado (CAR) | < 250 mg/Nm ³ (CAR) | 15% |
| | | | Utilização de uma das seguintes técnicas ou várias em combinação: II. Técnicas de fim-de-linha, entre as quais: ii. redução catalítica seletiva (RCS). | < 120 mg/Nm ³ (RCS) | 15% |
| Sistema Primário de Despoeiramento | Dibenzodioxinas/Dibenzofuranos Policlorados (PCDD/PCDF) | 25 | Injeção de agentes de adsorção adequados na conduta de gases residuais da linha de sinterização antes de proceder ao despoeiramento com um filtro de mangas. | < 0,05- 0,2 ng I-TEQ/Nm ³ * | - |
| | | | Injeção de agentes de adsorção adequados na conduta de gases residuais da linha de sinterização antes de proceder ao despoeiramento com precipitadores eletrostáticos avançados (se os filtros de mangas não forem aplicáveis). | < 0,2 – 0,4 ng-I-TEQ/Nm ³ | - |
| Sistema Secundário de Despoeiramento (emissões secundárias provenientes da descarga da linha de sinterização, da | MP | 26 | Utilização da seguinte técnica: I. Cobertura e/ou isolamento | < 10 mg/Nm ³ | - |

| Fontes de Emissão | Parâmetro | Número da MTD no documento | MTD – UE | Valor de Emissão Associado às Melhores Técnicas Disponíveis (VEA-MTD) (mg/Nm³) | %O₂ |
|---|------------------|-----------------------------------|---|--|-----------------------|
| trituração, do arrefecimento, da seleção e dos pontos de transferência de sinter) | | | Utilização da seguinte técnica: II. Precipitador eletrostático ou filtro de mangas | < 30 mg/Nm ³ | - |

* ng I-TEQ/Nm³: representa a quantidade (em nanogramas) de dioxinas e furanos com toxicidade equivalente à 2,3,7,8-TCDD, por metro cúbico de gás seco e ajustado a condições normais.

Fonte: Comissão Europeia (2012a).

Tabela 4 - Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) e Valores de Emissão Associados para Fontes de Emissão do Alto-Forno segundo as Conclusões MTD da União Europeia (UE) (Decisão de Execução UE 2012/135).

| Fontes de Emissão | Parâmetro | Número da MTD no documento | MTD – EU | Valor de Emissão Associado às Melhores Técnicas Disponíveis (VEA-MTD) (mg/Nm ³) | %O ₂ |
|--|---------------------------|----------------------------|---|---|-----------------|
| Carregamento a partir dos silos de armazenamento da injeção de carvão | Material Particulado (MP) | 59 | Capturar as emissões de partículas e realizar o despoeiramento subsequente a seco. | < 20 | - |
| Nave de vazamento: furos de sangria, canais de vazamento, pontos de carregamento da panela torpedo e sifões (casa ou ala de corrida) | MP | 61 | <p>Utilização das seguintes técnicas:</p> <p>I. Cobertura dos canais de vazamento</p> <p>II. Otimização da eficácia de captura de emissões difusas de partículas e de fumos com a subsequente limpeza dos efluentes gasosos por meio de um precipitador eletrostático ou filtro de mangas</p> <p>III. Supressão de fumos utilizando nitrogênio durante o vazamento, se aplicável e se não tiver sido instalado um sistema de coleta e despoeiramento das emissões provenientes do vazamento.</p> <p>Os valores de emissão associados às melhores técnicas disponíveis se aplicam quando for utilizada a técnica II.</p> | < 1-15 | - |

| Fontes de Emissão | Parâmetro | Número da MTD no documento | MTD – EU | Valor de Emissão Associado às Melhores Técnicas Disponíveis (VEA-MTD) (mg/Nm ³) | %O ₂ |
|---|---|----------------------------|---|---|-----------------|
| Gases de alto-forno limpos (concentração de partículas residuais) | MP | 64 | Utilização de uma das seguintes técnicas ou várias em combinação: I. Dispositivos de despoeiramento a seco, como: i. defletores ii. captadores de partículas iii. ciclones iv. precipitadores eletrostáticos. II. Redução subsequente das partículas, por exemplo: i. lavadores tipo barreira ii. lavadores ventur iii. lavadores de estrangulamento iv. precipitadores eletrostáticos úmidos v. desintegradores | < 10 | - |
| | MP | | | <10 | 3% |
| Fornos de ar quente (Estufa de <i>Cowper</i>) | Óxidos de enxofre (SO _x) - expresso como SO ₂ | 65 | Utilização dos gases excedentes dessulfurados e despoeirados, os gases de alto-forno isentos de partículas, os gases do conversor de oxigênio isentos de partículas e gás natural, individualmente ou em combinação. | < 200 | 3% |
| | Óxidos de nitrogênio (NO _x) - expresso como NO ₂ | | | <100 | 3% |

Fonte: Comissão Europeia (2012a).

Tabela 5 - Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) e Valores de Emissão Associados para Fontes de Emissão da Aciaria LD segundo as Conclusões MTD da União Europeia (UE) (Decisão de Execução UE 2012/135).

| Fontes de Emissão | Parâmetro | Número da MTD no documento | MTD – EU | Valor de Emissão Associado às Melhores Técnicas Disponíveis (VEA-MTD) (mg/Nm ³) | %O ₂ |
|--------------------------------------|---------------------------|----------------------------|--|---|-----------------|
| Fonte Primária (combustão reprimida) | Material Particulado (MP) | 75 | Recuperação dos gases do conversor de oxigênio através da combustão reprimida consiste em extrair os gases do conversor de oxigênio, na medida do possível, e limpá-los utilizando as seguintes técnicas em combinação: I. Utilização de um processo de combustão reprimida. II. Pré-despoeiramento para eliminar as partículas de maiores dimensões por meio de técnicas de separação a seco (por exemplo, defletor, ciclone) ou de separadores úmidos. III. Redução das partículas por meio de: i. despoeiramento a seco (por exemplo, precipitador eletrostático) para instalações novas e instalações existentes. | 10 - 30 | |
| | | | Recuperação dos gases do conversor de oxigênio através da combustão reprimida consiste em extrair os gases do conversor de oxigênio, na medida do possível, e limpá-los utilizando as seguintes técnicas em combinação: I. Utilização de um processo de combustão reprimida. II. Pré-despoeiramento para eliminar as partículas de maiores dimensões por meio de técnicas de separação a seco (por exemplo, defletor, ciclone) ou de separadores úmidos. III. Redução das partículas por meio de: ii. despoeiramento por via úmida (por exemplo, lavador ou precipitador eletrostático úmido) para instalações existentes. | <50 | |
| Fonte Primária (combustão completa) | MP | 76 | Recuperação dos gases do conversor de oxigênio durante a sopragem de oxigênio no caso de combustão completa consiste em reduzir as emissões de partículas utilizando uma das seguintes técnicas: I. Despoeiramento a seco (por exemplo, precipitador eletrostático ou filtro de mangas) para instalações novas e instalações existentes | 10 - 30 | |

| Fontes de Emissão | Parâmetro | Número da MTD no documento | MTD – EU | Valor de Emissão Associado às Melhores Técnicas Disponíveis (VEA-MTD) (mg/Nm ³) | %O ₂ |
|----------------------------|-----------|----------------------------|---|---|-----------------|
| | | | Recuperação dos gases do conversor de oxigênio durante a sopragem de oxigênio no caso de combustão completa consiste em reduzir as emissões de partículas utilizando uma das seguintes técnicas: II. Despoeiramento por via úmida (por exemplo, lavador ou precipitador eletrostático úmido) para instalações existentes. | <50 | |
| Despoeiramento Secundário* | MP | 78 | Minimizar as emissões de partículas através de técnicas integradas nos processos, tais como técnicas gerais para evitar ou controlar as emissões difusas ou fugas, e da utilização de isolamentos apropriados e coberturas com extração eficiente, com subsequente limpeza dos efluentes gasosos por meio de um filtro de mangas. | <1-15 | |
| | | | Minimizar as emissões de partículas através de técnicas integradas nos processos, tais como técnicas gerais para evitar ou controlar as emissões difusas ou fugas, e da utilização de isolamentos apropriados e coberturas com extração eficiente, com subsequente limpeza dos efluentes gasosos por meio de um precipitador eletrostático. | <20 | |
| | | | MTD para despoeiramento secundário se as emissões do pré-tratamento de metal quente e da metalurgia secundária forem tratadas separadamente no filtro de manga. | <1-10 | |
| | | | MTD para despoeiramento secundário se as emissões do pré-tratamento de metal quente e da metalurgia secundária forem tratadas separadamente no precipitador eletrostático. | <20 | |

* Incluindo as emissões dos seguintes processos:

- Transferência de do metal quente proveniente da panela torpedo (ou do misturador de metal quente) para a panela de carregamento;
- Pré-tratamento do metal quente (nomeadamente, pré-aquecimento de recipientes, dessulfuração, desfosforação, remoção de escórias, processos de transferência de metal quente e pesagem);
- Processos relacionados com o conversor de oxigênio, como pré-aquecimento de recipientes, entorna durante a sopragem de oxigênio, carregamento de metal quente e sucata, vazamento de aço líquido e escórias do conversor de oxigênio;
- Metalurgia secundária e vazamento contínuo.

Fonte: Comissão Europeia (2012a).

Tabela 6 - Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) e Valores de Emissão Associados para Fontes de Emissão da Laminação a Quente segundo as Conclusões MTD da União Europeia (UE) (Decisão de Execução (UE) 2022/2110 da Comissão).

| Fontes de Emissão | Parâmetro | Número da MTD no documento | MTD – EU | Valor de Emissão Associado às Melhores Técnicas Disponíveis (VEA-MTD) (mg/Nm ³) | %O ₂ |
|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|--|---|-----------------|
| Processo de aquecimento da carga | Material Particulado (MP) | 20 | <p>Uso de eletricidade produzida a partir de fontes de energia não fósseis ou da técnica a., em combinação com a técnica b., conforme indicado a seguir:</p> <p>a. Utilização de combustíveis com baixo teor de partículas e de cinzas (entre os combustíveis com baixo teor de partículas e de cinzas incluem-se, por exemplo, o gás natural, o gás liquefeito de petróleo, os gases de alto-forno despoeirados e os gases do conversor de oxigênio despoeirados) → aplicabilidade geral.</p> <p>b. Limitação do arrastamento de partículas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - a limitação do arrastamento de partículas efetua-se, por exemplo, pelas seguintes vias: tanto quanto possível, utilização de carga limpa ou limpeza da carga para remover a calamina e as partículas soltas antes de a introduzir no forno - minimização da produção de partículas devida a danos provocados no revestimento refratário, por exemplo evitando o contato direto das chamas com o revestimento refratário, utilizando revestimentos cerâmicos neste último; - evitar o contato direto da chama com a carga → não é aplicável no caso dos fornos de chama direta. | < 2-10 | |
| Processo de aquecimento da carga | Dióxido de enxofre (SO ₂) | 21 | <p>Uso de eletricidade produzida a partir de fontes de energia não fósseis ou de um combustível, ou de uma combinação de combustíveis, com baixo teor de enxofre → entre os combustíveis com baixo teor de enxofre incluem-se, por exemplo, o gás natural, o gás liquefeito de petróleo, o gás de alto-forno, o gás de conversor de oxigênio e o gás rico em CO resultante da produção de ferrocrômio.</p> <p><u>O VEA-MTD não se aplica a instalações que utilizem 100 % de gás natural ou 100 % de aquecimento elétrico.</u></p> <p><i>* O limite superior do intervalo do VEA-MTD pode ser mais elevado (até 300 mg/Nm³) se utilizar uma percentagem elevada de gás de coque (> 50 % da alimentação de energia).</i></p> | 50-200 | |

| Fontes de Emissão | Parâmetro | Número da MTD no documento | MTD – EU | Valor de Emissão Associado às Melhores Técnicas Disponíveis (VEA-MTD) (mg/Nm ³) | %O ₂ |
|----------------------------------|---|----------------------------|---|---|-----------------|
| Processo de aquecimento da carga | Óxidos de nitrogênio (NO _x) - expresso como NO ₂ | 22 | <p>Uso de eletricidade produzida a partir de fontes de energia não fósseis ou de uma combinação adequada das técnicas indicadas:</p> <p>Redução da produção de emissões:</p> <p>a) Utilização de um combustível ou de uma combinação de combustíveis com baixo potencial de formação de NO_x;</p> <p>b) Sistema de automatização e de controlo do forno;</p> <p>c) Otimização da combustão;</p> <p>d) Queimadores de baixas emissões de NO_x;</p> <p>e) Recirculação de gases de combustão;</p> <p>f) Limitação da temperatura de pré-aquecimento do ar;</p> <p>g) Combustão sem chama;</p> <p>h) Combustão oxi-combustível.</p> <p>Tratamento dos efluentes gasosos:</p> <p>i) Redução catalítica seletiva (RCS);</p> <p>j) Redução não catalítica seletiva (RNCS);</p> <p>k) Otimização da conceção e do funcionamento da RNCS/RCS.</p> | <p>Reaquecimento:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalações novas: 80-200 • Instalações existentes: 100-350 <p>Aquecimento intermédio: 100-250</p> <p>Pós aquecimento: 100-200</p> | 3 % |

| Fontes de Emissão | Parâmetro | Número da MTD no documento | MTD – EU | Valor de Emissão Associado às Melhores Técnicas Disponíveis (VEA-MTD) (mg/Nm ³) | %O ₂ |
|--|---|----------------------------|--|---|-----------------|
| Processo de aquecimento da carga reaaquecimento, aquecimento intermédio, pós aquecimento) | NO _x - expresso como NO ₂ | 22 | <p>Uso de eletricidade produzida a partir de fontes de energia não fósseis ou de uma combinação adequada das técnicas indicadas: Redução da produção de emissões: a) Utilização de um combustível ou de uma combinação de combustíveis com baixo potencial de formação de NO_x; b) Sistema de automatização e de controlo do forno; c) Otimização da combustão; d) Queimadores de baixas emissões de NO_x; e) Recirculação de gases de combustão; f) Limitação da temperatura de pré-aquecimento do ar; g) Combustão sem chama; h) Combustão oxí-combustível. Tratamento dos efluentes gasosos: i) Redução catalítica seletiva (RCS); j) Redução não catalítica seletiva (RNCS); k) Otimização da conceção e do funcionamento da RNCS/RCS. ** O limite superior do intervalo do VEA-MTD pode ser mais elevado (até 550 mg/Nm³) se utilizar uma percentagem elevada de gás de coque ou de gás rico em CO resultante da produção de ferrocromo (> 50 % da alimentação de energia).</p> | 100-350** | 3 % |
| Processamento mecânico (incluindo o corte longitudinal, a descalaminação, a retificação, o desbaste, a laminagem, o acabamento e o nivelamento), chanfragem (exceto a chanfragem manual) e soldadura | MP | | Uso da técnica a. ou da técnica b., em combinação com a técnica c., conforme indicado a seguir: Captura das emissões | < 2-5*** | - |
| | Níquel (Ni) | 42 | a. Chanfragem confinada e retificação confinada, em combinação com extração de ar; b. Extração de ar tão próxima quanto possível da fonte de emissão. Tratamento dos efluentes gasosos | 0,01-0,1 | - |
| | Chumbo (Pb) | | c. Precipitador eletrostático; d. Filtros de mangas; e. Depuração por via úmida. *** Caso não seja aplicável um filtro de mangas, o limite superior do intervalo do VEA-MTD pode ser mais elevado (até 7 mg/Nm ³) | 0,01-0,035 | - |

Fonte: Comissão Europeia (2022).

3.3 Legislação Brasileira

3.3.1 Resolução CONAMA nº 382/2006

A Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006, estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos provenientes de fontes fixas, com o objetivo minimizar os impactos à qualidade do ar, visando, assim, proteger a saúde e o bem-estar da população. Essa norma do CONAMA define padrões de emissão para diferentes substâncias, tais como: MP, NO_x, SO₂ e CO, conforme o tipo de atividade industrial e o combustível utilizado. A resolução também especifica critérios para a medição das emissões, a fim de garantir o cumprimento das exigências legais (Brasil, 2007).

Os limites de emissões definidos pela CONAMA nº 382/2006 para as fontes fixas de indústrias siderúrgicas a coque estão listados na Tabela 7.

Tabela 7 - Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos estabelecidos na Resolução CONAMA nº 382/2006 para fontes fixas de indústrias siderúrgicas integradas a coque.

| Unidade de Produção | Fontes de emissão pontual | MP ⁽¹⁾ [mg/Nm ³] | SO ₂ ⁽¹⁾ [mg/Nm ³] | NO _x ⁽¹⁾ (como NO ₂) [mg/Nm ³] | %O ₂ ⁽¹⁾ |
|---------------------|--|--|---|--|--------------------------------|
| Coqueria | Sistema de Despoeiramento do Desenfornamento | 40 | NA | NA | N.A.* |
| | Câmara de combustão dos Fornos de Coque | 50 | 800 | 700 | 7,00% |
| Sinterização | Sistema Primário de Despoeiramento | 70 | 600 | 700 | N.A. |
| | Sistema Secundário de Despoeiramento | 70 | NA | NA | |
| Alto Forno a Coque | Sistema de Despoeiramento da Casa de Estocagem | 40 | NA | NA | |
| | Sistema de Despoeiramento da Casa ou Ala de Corrida | | | | |
| Aciaria LD | Sistema Primário de Despoeiramento | 80 | NA | NA | |
| | Sistema Secundário de Despoeiramento | 40 | NA | NA | |
| | Sistema de Despoeiramento da Dessulfuração de Gusa | 40 | NA | NA | |
| Laminação | Fornos de Reaquecimento de Placas com Queima de Gases Siderúrgicos | 50 | 800 | 700 | 7,00% |

⁽¹⁾ os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca e no teor de O₂ explicitado.

* N.A. - Não aplicável.

Fonte: Adaptado de Brasil (2007).

3.3.2 Guia de Melhor Tecnologia Prática Disponível

O Guia MTPD é um documento elaborado pela CETESB como parte do Plano de Redução de Emissões de Fontes Estacionárias. Ele foi elaborado com o objetivo de fornecer uma referência técnica para o diagnóstico e controle das emissões atmosféricas de fontes fixas em diversos setores industriais, com base no Decreto Estadual nº 59.113/2013 e na Decisão de Diretoria nº 289/14/P (CETESB, 2017).

Este Guia foi utilizado neste trabalho como base de comparação com as conclusões dos documentos de referência europeus (BAT/BREFs), tendo em vista que o Brasil ainda não dispõe de um documento unificado e nacional que estabeleça, de forma detalhada e normativa, as melhores técnicas disponíveis para cada tipo de fonte de emissão em processos industriais. Dessa forma, este documento da CETESB é atualmente uma das referências mais técnicas e completas disponíveis no país sobre o tema.

No que se refere às fontes fixas de unidades siderúrgicas, Guia MTPD traz diretrizes detalhadas no Capítulo 7 “Siderurgia e Metalurgia”, abrangendo os processos de usinas integradas e semi-integradas, incluindo as etapas de laminação e trefilagem. Nesse capítulo, conforme apresentado nas Tabelas 8 a 12 são descritas as principais fontes de emissão em cada etapa do processo produtivo das usinas integradas, os poluentes associados a essas fontes e as MTPD recomendadas (CETESB, 2017).

Tabela 8 - Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis (MTPD) recomendadas pelo Guia da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a redução e controle de emissões atmosféricas de fontes fixas da coqueria.

| Fontes de Emissão | Parâmetro | MTPD |
|--|--|---|
| Preparação do carvão, incluindo trituração, moagem, pulverização e seleção | Material Particulado (MP) | Utilização de uma das seguintes técnicas ou várias em combinação: <ul style="list-style-type: none"> • edificação e/ou isolamento dos dispositivos (tritador, pulverizador, crivos); • exaustão e utilização eficazes de sistemas subsequentes de despoejamento a seco. |
| Armazenamento e o manuseio de carvão pulverizado | MP | <p>Para evitar ou reduzir emissões difusas, utilização de uma das seguintes técnicas ou várias em combinação:</p> <ul style="list-style-type: none"> • armazenamento dos materiais pulverizados em silos e armazéns; • utilização de transportadores fechados ou de transportadores em recinto fechado; • minimização da altura de queda dos materiais, dependendo das dimensões e da construção da instalação; • redução das emissões provenientes do carregamento da torre de carvão e do vagão de carga. <p>Carregar as câmaras do forno de coque com sistemas de carga de emissões reduzidas. O carregamento “sem fumo” ou o carregamento sequencial com colunas montantes duplas ou tubos bifurcados são os tipos preferíveis.</p> <p>Os gases e partículas devem ser captados e tratados. O tratamento deve possuir uma exaustão eficaz das emissões e subsequente combustão dos gases, para destruição dos compostos orgânicos antes de serem lançados a atmosfera, bem como a utilização de um filtro de mangas para reduzir as emissões de partículas.</p> |
| Forno de coque | MP, Óxidos de Enxofre (SOx) e Óxidos de Nitrogênio (NOx) | <p>Reduzir as emissões mediante uma produção de coque contínua e sem perturbações, utilizando as seguintes técnicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • fazer uma manutenção extensiva das câmaras do forno, das portas do forno e das juntas da estrutura, das colunas montantes, dos orifícios de carregamento e de outros equipamentos (deve ser realizado um programa sistemático por pessoal treinado especialmente para proceder à detecção e à manutenção); • evitar flutuações acentuadas da temperatura; • observar e monitorizar cuidadosamente o forno de coque; • limpar portas, juntas da estrutura, orifícios de carregamento, tampas e colunas montantes após o manuseio (aplicável em novas instalações e, em alguns casos, em instalações existentes); • manter um fluxo livre dos gases nos fornos de coque; • regular uma pressão adequada durante a coqueificação e aplicar portas munidas de juntas de vedação flexíveis, armadas com molas ou portas com cutelo de vedação (no caso dos fornos com ≤ 5 m de altura e em bom estado de funcionamento); • utilizar colunas montantes estanques, seladas com água, a fim de reduzir as emissões visíveis provenientes do aparelho que faz a passagem da bateria de fornos de coque para o coletor, o tubo de subida e os tubos bifurcados estacionários; • vedar os orifícios de carregamento com uma suspensão de argila (ou outro material de vedação apropriado), a fim de reduzir as emissões visíveis provenientes de todos os orifícios; |

| Fontes de Emissão | Parâmetro | MTPD |
|-------------------------------|---------------------------------------|--|
| | | <ul style="list-style-type: none"> • garantir uma coquefação completa (evitando o desenformamento de coque mal cozido), mediante a aplicação de técnicas adequadas; • instalar câmaras de maiores dimensões nos fornos de coque (aplicável em novas instalações ou, em alguns casos de substituição integral da instalação, nas fundições antigas); • utilizar a regulação variável da pressão nas câmaras do forno durante a coquefação (a possibilidade de instalar esta técnica em instalações existentes deve ser examinada criteriosamente e está sujeita à situação individual de cada instalação). |
| Aquecimento do forno de coque | MP, SO _x e NO _x | <p>Utilização das seguintes técnicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • prevenção de fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento por meio da operação regular do forno de coque; • reparação das fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento; • incorporação de técnicas com baixas emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x); • utilização de gases de processo dessulfurados do gás de coqueria. |
| Desenformamento de coque | MP | <p>Utilização das seguintes técnicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • exaustão através de uma máquina de transferência de coque integrada equipada com uma cobertura; • utilização de tratamento do gás captado, com um filtro de mangas ou outro sistema de redução; |
| Extinção de coque | MP | <p>Utilização das seguintes técnicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • utilização da extinção a seco do coque com recuperação do calor sensível e remoção das partículas provenientes das operações de carregamento, manuseio e seleção através de um filtro de mangas; • utilização da técnica convencional de extinção úmida do coque com emissões reduzidas. |
| Manuseio do coque | MP | Evitar ou reduzir as emissões de partículas utilizando exaustão eficaz e subsequente despoeiramento a seco. |

Fonte: CETESB (2017).

Tabela 9 - Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis (MTPD) recomendadas pelo Guia da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a redução e controle de emissões atmosféricas de fontes fixas da sinterização.

| Fontes de Emissão | Parâmetro | MTPD |
|---|------------------------------------|---|
| Linhas de sinterização (emissões primárias) | Óxidos de Enxofre (SOx) | <p>Para as emissões de SOx utilizar uma das seguintes técnicas ou várias em combinação:</p> <ul style="list-style-type: none"> • diminuição da entrada de enxofre no processo utilizando pó de coque com baixo teor de enxofre; • diminuição da entrada de enxofre no processo por meio da minimização do consumo de pó de coque; • diminuição da entrada de enxofre no processo utilizando minério de ferro com baixo teor de enxofre; • injeção de agentes de adsorção adequados nos gases residuais da linha de sinterização antes do despoejamento por filtro de manga; • processo de dessulfuração úmida ou de carvão ativado regenerado (CAR). |
| Linhas de sinterização | Óxidos de Nitrogênio (NOx) | <p>Para as emissões das linhas de sinterização consiste em reduzir as emissões totais de NOx utilizando uma das seguintes técnicas ou várias em combinação:</p> <ul style="list-style-type: none"> • recirculação de gases residuais; • utilização de queimadores com baixas emissões de NOx para ignição; • processo de carvão ativado regenerado (CAR); • redução catalítica seletiva (SCR). |
| Descarga da linha de sinterização, da trituração, do arrefecimento, da seleção e dos pontos de transferência de sinter (emissões secundárias) | Material Particulado (MP) | <p>Evitar as emissões de partículas e/ou alcançar uma exaustão eficiente e, conseqüentemente, reduzir as emissões de partículas utilizando uma das seguintes técnicas ou várias em combinação:</p> <ul style="list-style-type: none"> • cobertura e/ou isolamento • precipitador eletrostático ou filtro de mangas. |
| Descarga da linha de sinterização, da trituração, do arrefecimento, da seleção e dos pontos de transferência de sinter (emissões secundárias) | Compostos Orgânicos Voláteis (COV) | <p>Diminuir o teor de hidrocarbonetos na produção de sinter por meio de uma seleção apropriada e do pré-tratamento dos resíduos do processo reciclados.</p> <p>A utilização de hidrocarbonetos pode ser minimizada, sobretudo pela redução da admissão de óleo. O óleo entra na produção de sinter principalmente por meio da adição de escamas de laminação. O teor de óleo das escamas de laminação pode variar significativamente, dependendo da origem do material utilizado.</p> |

Fonte: CETESB (2017).

Tabela 10 - Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis (MTPD) recomendadas pelo Guia da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a redução e controle de emissões atmosféricas de fontes fixas do alto forno.

| Fontes de Emissão | Parâmetro | MTPD |
|---|---------------------------|--|
| Carregamento da unidade de injeção de carvão a partir dos silos de armazenamento | Material Particulado (MP) | Capturar as emissões de partículas e realizar o despoeiramento a seco. |
| Preparação (mistura, dosagem) e transporte da carga | MP | Minimizar as emissões de partículas e proceder à exaustão com subsequente despoeiramento por meio de um precipitador eletrostático ou filtro de mangas. |
| Nave de vazamento (furos de sangria, canais de vazamento, pontos de carregamento da panela torpedo, sifões) | MP | Evitar ou reduzir as emissões difusas utilizando as seguintes técnicas: <ul style="list-style-type: none"> • Cobertura dos canais de vazamento; • Otimização da eficácia de captura de emissões difusas de partículas e de fumos com a subsequente limpeza dos efluentes gasosos por meio de um precipitador eletrostático ou filtro de mangas. |
| Carregamento | MP | Utilização de uma das seguintes técnicas ou várias em combinação: <ul style="list-style-type: none"> • bocal sem campânula com condicionamento primário e secundário; • sistema de recuperação dos gases; • utilização dos gases de exaustão do alto-forno para pressurizar os silos superiores. • dispositivos de despoeiramento a seco, como: defletores, captadores de partículas, ciclones, precipitadores eletrostáticos. |

Fonte: CETESB (2017).

Tabela 11 - Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis (MTPD) recomendadas pelo Guia da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a redução e controle de emissões atmosféricas de fontes fixas da aciaria LD.

| Fontes de Emissão | Parâmetro | MTPD |
|---|---------------------------|--|
| Produção e Vazamento de Aço em Conversor de Oxigênio - Recuperação dos gases do conversor de oxigênio | Material Particulado (MP) | <p>Extraír os gases do conversor, na medida do possível, e limpá-los utilizando as seguintes técnicas em combinação:</p> <ul style="list-style-type: none"> • pré-despoeiramento para eliminar as partículas de maiores dimensões por meio de técnicas de separação a seco (por exemplo, defletor, ciclone) ou de separadores úmidos; • redução das partículas por meio de despoeiramento a seco (por exemplo, precipitador eletrostático) ou despoeiramento por via úmida (por exemplo, lavador). |
| Produção e Vazamento de Aço em Conversor de Oxigênio - Recuperação dos gases do conversor de oxigênio durante a sopragem de oxigênio, no caso de combustão completa | MP | <p>Reduzir as emissões utilizando uma das seguintes técnicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • despoeiramento a seco (por exemplo, precipitador eletrostático ou filtro de mangas); • despoeiramento por via úmida (por exemplo, lavador ou precipitador eletrostático úmido). |
| Despoeiramento Secundário | MP | <ul style="list-style-type: none"> • Minimizar as emissões de partículas por meio de técnicas integradas nos processos, tais como técnicas gerais para evitar ou controlar as emissões difusas ou fugas; • Utilização de isolamentos apropriados e coberturas com exaustão eficiente, com subsequente limpeza dos efluentes gasosos por meio de um filtro de mangas ou precipitador eletrostático. <p>O Guia da CETESB inclui as emissões do processo de despoeiramento da dessulfuração do gusa no despoeiramento secundário da aciaria LD.</p> |

Fonte: CETESB (2017).

Tabela 12 - Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis (MTPD) recomendadas pelo Guia da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a redução e controle de emissões atmosféricas de fontes fixas da laminação a quente.

| Fontes de Emissão | Parâmetro | MTPD |
|--|----------------------------|--|
| Chanfragem mecânica | Material Particulado (MP) | <ul style="list-style-type: none"> • Espaços fechados para a chanfragem mecânica e redução de poeiras por filtração em filtros de tecido; • Precipitador eletrostático nos casos em que os filtros de mangas de tecido não possam funcionar devido ao fato de os fumos serem muito úmidos; • Coleta separada de calamina/limalha de ferro provenientes das operações de chanfragem. |
| | | Retificação |
| Fornos de reaquecimento e tratamento térmico | MP | Evitar excedentes de ar e perdas de calor durante o carregamento, por meio de medidas operacionais (abertura das portas o mínimo necessário para a operação de carregamento) ou de meios estruturais (instalação de portas multissegmentadas para se obter um fecho mais estanque). |
| | Óxidos de Enxofre (SOx) | Escolha cuidadosa do combustível e implementação de sistemas de automatização/controle dos fornos para otimizar as condições de aquecimento para o gás natural e misturas gasosas. |
| | Óxidos de Nitrogênio (NOx) | <ul style="list-style-type: none"> • Recuperação de calor dos gases residuais, com temperatura acima de 350°C, por meio de pré-aquecimento do material de alimentação; • Recuperação do calor dos gases residuais, com temperatura acima de 350°C, por meio de sistemas de queimadores equipados com regeneradores ou recuperadores; • Recuperação do calor dos gases residuais, com temperatura acima de 350°C, por meio de uma caldeira de recuperação ou de um sistema de arrefecimento; • Queimadores do tipo <i>LowNOX</i>; • Limitação da temperatura de pré-aquecimento do ar. |

Fonte: CETESB, 2017.

4 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido com base em uma abordagem qualitativa, fundamentada na análise documental e comparativa. A execução do trabalho foi dividida em etapas, que serão descritas e detalhadas nos subitens desta seção.

4.1 Delimitação do escopo do estudo

O escopo deste estudo contempla os principais processos da cadeia produtiva de uma usina siderúrgica integrada, a saber: coqueria, sinterização, alto-forno a coque, aciaria LD (incluindo dessulfuração e refino secundário) e laminação (limitando-se a laminação a quente). A definição dos processos analisados baseou-se na publicação *Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de ferro-gusa e aço* elaborado do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações em conjunto com a ONU Meio Ambiente (BRASIL, 2017).

A partir disso, na Revisão Bibliográfica, foram levantadas as exigências regulatórias e recomendações técnicas aplicáveis ao monitoramento de emissões atmosféricas oriundas das fontes fixas desses processos.

4.2 Análise Comparativa

Com base nas informações obtidas na revisão bibliográfica, foi realizada uma análise comparativa entre as exigências legais e referências técnicas brasileiras e europeias, relacionadas ao controle de emissões atmosféricas em usinas siderúrgicas integradas a coque, restringindo-se às fontes emissoras contempladas no Anexo XIII da Resolução CONAMA nº 382/2006 (Tabela 7).

Para tanto, foram elaboradas tabelas comparativas que organizam as exigências normativas em parâmetros equivalentes entre Brasil e União Europeia. Para cada etapa do processo e suas respectivas fontes emissoras, foram avaliados os seguintes aspectos apresentados na Tabela 13:

Tabela 13 - Aspectos avaliados para cada fonte de emissão atmosférica em usinas siderúrgicas integradas a coque, com base nas exigências normativas e referências técnicas do Brasil e da União Europeia.

| Aspecto Comparado | Legislação / Documentos de Referência Brasil | Legislação / Documentos de Referência União Europeia |
|---|--|--|
| Parâmetros monitorados em cada fonte de emissão atmosférica | Resolução CONAMA n° 382/2006 (Brasil, 2007) | Conclusão das Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) para Produção de Ferro e Aço (Comissão Europeia, 2012a); Conclusão das MTD para Processamento de Metais Ferrosos (Comissão Europeia, 2022). |
| Limites de emissão estabelecidos para cada parâmetro em cada uma das fontes | Resolução CONAMA n° 382/2006 | Conclusão das MTD para Produção de Ferro e Aço; Conclusão das MTD para Processamento de Metais Ferrosos. |
| Melhores técnicas / tecnologias disponíveis de controle e prevenção das emissões atmosféricas | Guia de Melhor Tecnologia Prática Disponível (MTPD) da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) | Conclusão das MTD para Produção de Ferro e Aço; Conclusão das MTD para Processamento de Metais Ferrosos. |

Fonte: Autora (2025).

Dessa forma, para cada um dos parâmetros de interesse das fontes fixas listadas, foram comparados os limites legais de emissão e as melhores técnicas / tecnologias disponíveis de controle e prevenção das emissões atmosféricas desses poluentes.

Cumprе ressaltar que o Guia MTPD da CETESB foi utilizado, tendo em vista que não há uma referência técnica a nível nacional que elenque as alternativas de melhores tecnologias disponíveis para alcançar os limites de emissão definidos na Resolução CONAMA n° 382/2006.

Para viabilizar uma comparação coerente entre os limites de emissão, foi necessário uniformizar conceitos e critérios entre os documentos analisados, incluindo a base de cálculo e a unidade de medida dos poluentes.

A Resolução CONAMA n° 382/2006 estabelece que todos os resultados de emissão de poluentes atmosféricos (MP, NOx e SOx), gerados nas indústrias siderúrgicas, devem ser expressos na unidade de concentração miligrama por normal metro cúbico (mg/Nm³), em base

seca e no teor de oxigênio (O₂) explicitado. Esta Resolução define, também, que nas avaliações periódicas, o atendimento aos limites de emissão estabelecidos poderá ser verificado em condições típicas de operação (Brasil, 2007).

Nas conclusões MTD para a produção de ferro e aço, foi definido que os VEA-MTD são expressos como o teor de massa de substâncias emitidas por volume de gás residual em condições-padrão (273,15 K, 101,3 kPa), após dedução do teor de vapor de água, expressa nas unidades: g/Nm³, mg/Nm³, µg/Nm³ ou ng/Nm³ (Comissão Europeia, 2012a).

Já nas conclusões MTD para o processamento de metais ferrosos, foi definido que os VEA-MTD são concentrações (massa de substâncias emitidas por volume de gases de combustão ou de ar extraído) em condições-padrão (gás seco à temperatura de 273,15 K e à pressão de 101,3 kPa) e expressas em mg/Nm³ (Comissão Europeia, 2022).

Para ambas as Conclusões MTD e para a Resolução CONAMA nº 382/2006, entende-se que o NO_x é a soma de NO e NO₂, expresso como NO₂ e o SO_x a soma de SO₂ e trióxido de enxofre (SO₃), expresso como SO₂ (Brasil, 2007; Comissão Europeia, 2012a; Comissão Europeia, 2022).

Nos casos em que é indicado um teor de oxigênio de referência, exceto quando ocorrer a injeção de oxigênio puro no processo, a concentração medida é convertida para a condição referencial por meio da equação (1), que permite calcular a concentração das emissões correspondente ao teor de oxigênio de referência (Brasil, 2007; Comissão Europeia, 2022):

$$C_R = \frac{21-O_R}{21-O_M} \cdot C_M \quad (1)$$

na qual:

- C_R = concentração das emissões correspondente ao teor de oxigênio de referência;
- O_R = teor de oxigênio de referência, em porcentagem volumétrica;
- C_M = concentração medida das emissões;
- O_M = teor de oxigênio medido, em porcentagem volumétrica.

4.3 Análise crítica e discussão

Com base nas tabelas comparativas, foi conduzida uma análise crítica das convergências e divergências normativas, relacionando limites de emissões mais restritivos com as técnicas e tecnologias de controle e prevenção das emissões atmosféricas de poluentes recomendadas. Essa comparação objetivou entender se as diferenças nos sistemas de controle e prevenção de emissões atmosféricas, recomendadas nos documentos de referência da UE e do Brasil, justificam limites de emissões de poluentes diferentes.

4.4 Formulação de recomendações

Com base nos resultados da análise, foram propostas recomendações técnicas e regulatórias para melhorar nas práticas de monitoramento e controle de emissões atmosféricas e sugerir uma padronização regulatória visando à convergência com padrões internacionais de sustentabilidade.

5 RESULTADOS

5.1 Análise Comparativa por Fontes de Emissões

5.1.1 Fontes Fixas da Coqueria

As Tabelas 14 e 15 apresentam o comparativo dos limites de emissão e das MTD recomendadas nos documentos de referência do Brasil e da UE para o sistema de despoejamento do desenformamento da coqueria e para a câmara de combustão dos fornos de coque, respectivamente.

Tabela 14 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para o sistema de despoejamento do desenformamento da coqueria.

| Parâmetro | Limites de Emissão (mg/Nm ³) | %O ₂ | Melhores Técnicas Disponíveis |
|---|--|-----------------|---|
| Material Particulado (MP) (Brasil) | 40 | N.A.* | Utilização das seguintes técnicas: • exaustão através de uma máquina de transferência de coque integrada equipada com uma cobertura; • utilização de tratamento do gás captado, com um filtro de mangas ou outro sistema de redução. |
| MP (UE) | < 10 | N.A. | Redução das emissões de partículas utilizando as seguintes técnicas: I. Extração através de uma máquina de transferência de coque integrada equipada com uma cobertura; II. Utilização de tratamento no terreno do gás extraído com um filtro de mangas; III. Utilização de um vagão de coque móvel ou de um ponto. |
| | < 20 | | Redução das emissões de partículas utilizando as seguintes técnicas: I. Extração através de uma máquina de transferência de coque integrada equipada com uma cobertura; II. Utilização de tratamento no terreno do gás extraído com outro sistema de redução; III. Utilização de um vagão de coque móvel ou de um ponto. |

⁽¹⁾ Resolução CONAMA nº 382/2006 (Brasil, 2007) e Guia das Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017).

⁽²⁾ Conclusão sobre as Melhores Técnicas Disponíveis para a produção de ferro e aço (Decisão de Execução UE 2012/135) (Comissão Europeia, 2012a).

* N.A. - Não aplicável.

Fonte: Autora (2025).

Para o sistema de despoejamento do desenformamento, ambos os documentos recomendam técnicas bastante semelhantes, como exaustão localizada na máquina de transferência de coque,

cobertura da fonte de emissão, captação e tratamento dos gases por meio de filtro de mangas ou sistemas equivalentes. No entanto, o limite de emissão adotado pela União Europeia é significativamente mais restritivo: $<10 \text{ mg/Nm}^3$ com filtro de mangas ou $<20 \text{ mg/Nm}^3$ com outros sistemas, enquanto no Brasil o limite estabelecido pela CONAMA é de 40 mg/Nm^3 (Tabela 14).

Tabela 15 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para a câmara de combustão dos fornos de coque.

| Parâmetro | Limites de Emissão (mg/Nm ³) | %O ₂ | Melhores Técnicas Disponíveis |
|---|--|-----------------|--|
| Material Particulado (MP) (Brasil) | 50 | 7% | Utilização das seguintes técnicas: • prevenção de fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento por meio da operação regular do forno de coque; • reparação das fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento. |
| | 57,1 ⁽³⁾ | 5% | |
| MP (UE) | < 1-20 | 5% | Redução das emissões utilizando as seguintes técnicas: I. Prevenção de fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento através da operação regular do forno de coque; II. Reparação das fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento (aplicável apenas em instalações existentes). |
| Dióxido de Enxofre (SO ₂) (Brasil) | 800 | 7% | Utilização das seguintes técnicas: • prevenção de fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento por meio da operação regular do forno de coque; • reparação das fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento; • utilização de gases de processo dessulfurados do gás de coqueria. |
| | 914,3 ⁽³⁾ | 5% | |
| Óxido de Enxofre (SO _x) - expresso como SO ₂ (UE) | < 200 – 500 | 5% | Redução das emissões utilizando as seguintes técnicas: I. Prevenção de fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento através da operação regular do forno de coque; II. Reparação das fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento (aplicável apenas em instalações existentes); IV. Utilização de gases de processo dessulfurados do gás de coqueria. |
| Óxido de Nitrogênio (NO _x) - expresso como NO ₂ (Brasil) | 700 | 7% | Utilização das seguintes técnicas: • prevenção de fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento por meio da operação regular do forno de coque; • reparação das fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento; • incorporação de técnicas com baixas emissões de óxidos de nitrogênio (NO _x). |
| | 800 ⁽³⁾ | 5% | |

| Parâmetro | Limites de Emissão (mg/Nm ³) | %O ₂ | Melhores Técnicas Disponíveis |
|---|--|-----------------|---|
| NO_x - expresso como NO₂ (UE) | < 350 - 500* | 5% | Redução das emissões utilizando as seguintes técnicas: I. Prevenção de fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento através da operação regular do forno de coque; II. Reparação das fugas entre a câmara do forno e a câmara de aquecimento (aplicável apenas em instalações existentes); III. Incorporação de técnicas com baixas emissões de óxidos de nitrogênio (NO _x) na construção de novas baterias, como por exemplo a combustão por etapas e a utilização de tijolos mais finos e material refratário com melhor condutividade térmica (aplicável apenas em novas instalações). |
| | 500-650** | | * para novas instalações ou instalações que tenham sido substancialmente remodeladas (com menos de 10 anos). ** para instalações mais velhas com baterias em boas condições e que incorporem técnicas de baixas emissões de óxidos de nitrogênio (NO _x). |

⁽¹⁾ Resolução CONAMA n° 382/2006 (Brasil, 2007) e Guia das Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017).

⁽²⁾ Conclusão sobre as Melhores Técnicas Disponíveis para a produção de ferro e aço (Decisão de Execução UE 2012/135) (Comissão Europeia, 2012a).

⁽³⁾ Limite calculado conforme art. 3º, inciso III, alínea b da Resolução CONAMA n° 382/2006.

Fonte: Autora (2025).

Quanto à câmara de combustão dos fornos de coque, a disparidade entre os limites de emissão é ainda mais evidente. Para MP, o Brasil adota um limite de 50 mg/Nm³ a 7% O₂, que, recalculado a 5% O₂, representa cerca de 57,1 mg/Nm³. Já a UE impõe uma faixa de <1 a 20 mg/Nm³, revelando uma abordagem regulatória muito mais exigente. Apesar disso, as técnicas indicadas nos dois documentos de referência são semelhantes, envolvendo controle de fugas, manutenção das portas dos fornos e monitoramento operacional (Tabela 15).

Para o controle e redução da emissão de SO₂ / SO_x (expresso como SO₂) são recomendadas as mesmas técnicas no Brasil e na UE. Contudo, a Resolução CONAMA estabelece um limite de emissão deste poluente de 800 mg/Nm³, equivalente a 914,3 mg/Nm³ a 5% de O₂, enquanto a UE define valores mais restritivos, entre <200 a 500 mg/Nm³ (Tabela 15).

Já para o parâmetro NO_x, o limite brasileiro é de 700 mg/Nm³ (7% O₂) ou 800 mg/Nm³, se corrigido a 5% de O₂, enquanto a UE estabelece faixas entre <350–500 mg/Nm³, com flexibilidade até 650 mg/Nm³ em condições específicas. As MTD para as emissões deste parâmetro também são as mesmas, contudo, diferente do Guia da CETESB, a UE faz a diferenciação de limites conforme as características das instalações, além de fornecer um maior

detalhamento sobre as técnicas com baixas emissões de óxidos de nitrogênio recomendadas (Tabela 15).

5.1.2 Fontes Fixas da Sinterização

O comparativo dos limites de emissão e das MTD recomendadas nos documentos de referência do Brasil e da UE para o Sistema Primário de Despoeiramento e para o Sistema Secundário de Despoeiramento da sinterização estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 16 e 17.

Tabela 16 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para o sistema primário de despoeiramento da sinterização.

| Parâmetro | Limites de Emissão | %O ₂ | Melhores Técnicas Disponíveis |
|---|--------------------------------|-----------------|---|
| Material Particulado (MP) (Brasil) | 70 mg/Nm ³ | N.A.* | Evitar as emissões de partículas e/ou alcançar uma exaustão eficiente e, conseqüentemente, reduzir as emissões de Partículas utilizando uma das seguintes técnicas ou várias em combinação: <ul style="list-style-type: none"> • cobertura e/ou isolamento • precipitador eletrostático ou filtro de mangas. |
| MP (UE) | < 1 – 15 mg/Nm ³ | N.A. | Utilização de filtro de mangas. |
| | < 20 – 40 mg/Nm ³ | N.A. | Utilização de um sistema de precipitação eletrostática avançada sempre que os filtros de mangas não sejam aplicáveis. |
| Dióxido de Enxofre (SO₂) (Brasil) | 600 mg/Nm ³ | N.A. | Para as emissões de SO _x utilizar uma das seguintes técnicas ou várias em combinação: <ul style="list-style-type: none"> • diminuição da entrada de enxofre no processo utilizando pó de coque com baixo teor de enxofre; • diminuição da entrada de enxofre no processo por meio da minimização do consumo de pó de coque; • diminuição da entrada de enxofre no processo utilizando minério de ferro com baixo teor de enxofre; • injeção de agentes de adsorção adequados nos gases residuais da linha de sinterização antes do despoeiramento por filtro de manga; • processo de dessulfuração úmida ou de carvão ativado regenerado (CAR). |
| Óxidos de Enxofre (SO_x) - expresso como SO₂ (UE) | < 350 – 500 mg/Nm ³ | N.A. | Utilização de uma das seguintes técnicas ou várias em combinação: <ol style="list-style-type: none"> Diminuição da entrada de enxofre no processo utilizando pó de coque com baixo teor de enxofre Diminuição da entrada de enxofre no processo através da minimização do consumo de pó de coque Diminuição da entrada de enxofre no processo utilizando minério de ferro com baixo teor de enxofre Injeção de agentes de adsorção adequados na conduta de gases residuais da linha de sinterização antes do despoeiramento por filtro de manga |

| Parâmetro | Limites de Emissão | %O ₂ | Melhores Técnicas Disponíveis |
|---|---|-----------------|---|
| | < 100 mg/Nm ³ | N.A. | Utilização da técnica: V. Processo de dessulfuração úmida ou de carvão ativado regenerado (CAR) (tomando em especial atenção os pré-requisitos para a respetiva aplicação) |
| Óxidos de Nitrogênio (NOx) - expresso como NO₂ (Brasil) | 700 mg/Nm ³ | N.A. | Utilização de uma das seguintes técnicas ou várias em combinação: • recirculação de gases residuais; • utilização de queimadores com baixas emissões de NOx para ignição; • processo de carvão ativado regenerado (CAR); • redução catalítica seletiva (SCR). |
| NOx - expresso como NO₂ (UE) | < 350 – 500 mg/Nm ³ | 15% | Utilização de uma das seguintes técnicas ou várias em combinação: I. Medidas integradas nos processos, entre as quais: i. recirculação de gases residuais ii. outras medidas primárias, como a utilização de antracite ou a utilização de queimadores com baixas emissões de NOx para ignição. |
| | < 250 mg/Nm ³ | 15% | Utilização de técnica de fim-de-linha: processo de carvão ativado regenerado (CAR). |
| | < 120 mg/Nm ³ | 15% | Utilização de técnica de fim-de-linha: redução catalítica seletiva (RCS). |
| Dibenzodioxinas/ Dibenzofuranos Policlorados (PCDD/F) (Brasil) | - | - | - |
| PCDD/F (UE) | < 0,05- 0,2 [ng I-TEQ/Nm ³] | N.A. | Injeção de agentes de adsorção adequados na conduta de gases residuais da linha de sinterização antes de proceder ao despoeiramento com um filtro de mangas. |
| | < 0,2 – 0,4 [ng I-TEQ/Nm ³] | N.A. | Injeção de agentes de adsorção adequados na conduta de gases residuais da linha de sinterização antes de proceder ao despoeiramento com precipitadores eletrostáticos avançados (se os filtros de mangas não forem aplicáveis). |
| Merúrio (Hg) (Brasil) | - | - | - |
| Hg (UE) | < 0,03 – 0,05 mg/Nm ³ | N.A. | Seleção de matérias-primas com baixo teor de mercúrio ou tratar os gases residuais em combinação com a injeção de carvão ativo ou coque de lenhite ativado |

⁽¹⁾ Resolução CONAMA n° 382/2006 (Brasil, 2007) e Guia das Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017).

⁽²⁾ Conclusão sobre as Melhores Técnicas Disponíveis para a produção de ferro e aço (Decisão de Execução UE 2012/135) (Comissão Europeia, 2012a).

* N.A. - Não aplicável.

Fonte: Autora (2025).

Tabela 17 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para o sistema secundário de despoeiramento da sinterização.

| Parâmetro | Limites de Emissão (mg/Nm ³) | %O ₂ | Melhores Técnicas Disponíveis |
|---|--|-----------------|--|
| Material Particulado (MP) (Brasil) | 70 | N.A. | Evitar as emissões de partículas e/ou alcançar uma exaustão eficiente e, conseqüentemente, reduzir as emissões de partículas utilizando uma das seguintes técnicas ou várias em combinação: <ul style="list-style-type: none"> • cobertura e/ou isolamento • precipitador eletrostático ou filtro de mangas. |
| Material Particulado (UE) | < 10 | N.A. | Utilização da seguinte técnica: I. Cobertura e/ou isolamento |
| | < 30 | N.A. | Utilização da seguinte técnica: II. Precipitador eletrostático ou filtro de mangas |

⁽¹⁾ Resolução CONAMA nº 382/2006 (Brasil, 2007) e Guia das Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017).

⁽²⁾ Conclusão sobre as Melhores Técnicas Disponíveis para a produção de ferro e aço (Decisão de Execução UE 2012/135) (Comissão Europeia, 2012a).

* N.A. - Não aplicável.

Fonte: Autora (2025).

As Tabelas 16 e 17 mostram que os limites estabelecidos pela UE para os parâmetros MP e SO₂ são mais rigorosos do que os limites brasileiros, ainda que ambos os documentos de referência indiquem técnicas semelhantes para a redução e o controle das emissões.

No caso do NO_x, a legislação europeia apresenta três faixas de emissão para o sistema primário de despoeiramento da sinterização, com níveis de exigência progressivamente mais rigorosos conforme a técnica empregada. Apesar das técnicas recomendadas tanto na UE quanto no Brasil serem similares, o limite de emissão estipulado pela Resolução CONAMA nº 382/2006 (700 mg/Nm³) para esse parâmetro é mais permissivo do que até mesmo o VEA-MTD mais brando da UE (< 350 – 500 mg/Nm³, nos casos de utilização de medidas integradas nos processos) (Tabela 16). A comparação desses limites é dificultada, entretanto, pela ausência de especificação, na norma brasileira, de um teor de oxigênio de referência para as medições, ao passo que a regulamentação europeia adota explicitamente um teor de 15% de O₂.

Destaca-se, ainda, que a UE contempla limites de emissão para as dioxinas e furanos (PCDD/F) e o mercúrio (Hg), que não abordados na norma brasileira para o sistema primário de despoeiramento da sinterização (Tabela 16).

5.1.3 Fontes Fixas do Alto Forno a Coque

As Tabelas 18 e 19 apresentam a comparação entre os limites de emissão e as MTD recomendadas nos documentos de referência do Brasil e da UE para as duas fontes de emissões do alto forno, listadas no Anexo XIII da Resolução CONAMA nº 382/2006: o sistema de despoeiramento da casa de estocagem e o sistema de despoeiramento da ala de corrida.

Tabela 18 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para a casa de estocagem do alto forno a coque.

| Parâmetro | Limites de Emissão (mg/Nm ³) | %O ₂ | Melhores Técnicas Disponíveis |
|---|--|-----------------|--|
| Material Particulado (MP) (Brasil) | 40 | N.A.* | Capturar as emissões de partículas e realizar o despoeiramento a seco. |
| MP (UE) | < 20 | N.A. | Capturar as emissões de partículas e realizar o despoeiramento subsequente a seco. |

⁽¹⁾ Resolução CONAMA nº 382/2006 (Brasil, 2007) e Guia das Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017).

⁽²⁾ Conclusão sobre as Melhores Técnicas Disponíveis para a produção de ferro e aço (Decisão de Execução UE 2012/135) (Comissão Europeia, 2012a).

* N.A. - Não aplicável.

Fonte: Autora (2025).

Tabela 19 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para a casa ou ala de corrida do alto forno a coque.

| Parâmetro | Limites de Emissão (mg/Nm ³) | %O ₂ | Melhores Técnicas Disponíveis |
|---|--|-----------------|---|
| Material Particulado (MP) (Brasil) | 40 | N.A.* | <ul style="list-style-type: none"> • Cobertura dos canais de vazamento; • Otimização da eficácia de captura de emissões difusas de partículas e de fumos com a subsequente limpeza dos efluentes gasosos por meio de um precipitador eletrostático ou filtro de mangas. |
| MP (UE) | < 1-15 | N.A. | <p>Utilização das seguintes técnicas:</p> <p>I. Cobertura dos canais de vazamento</p> <p>II. Otimização da eficácia de captura de emissões difusas de partículas e de fumos com a subsequente limpeza dos efluentes gasosos por meio de um precipitador eletrostático ou filtro de mangas</p> <p>III. Supressão de fumos utilizando nitrogênio durante o vazamento, se aplicável e se não tiver sido instalado um sistema de coleta e despoeiramento das emissões provenientes do vazamento.</p> <p>Os valores de emissão associados às melhores técnicas disponíveis (VEA-MTD) se aplicam quando for utilizada a técnica II.</p> |

⁽¹⁾ Resolução CONAMA nº 382/2006 (Brasil, 2007) e Guia das Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017).

⁽²⁾ Conclusão sobre as Melhores Técnicas Disponíveis para a produção de ferro e aço (Decisão de Execução UE 2012/135) (Comissão Europeia, 2012a).

* N.A. - Não aplicável.

Fonte: Autora (2025).

As Tabelas 18 e 19 mostram que a UE impõe um limite de emissão para MP mais restritivo para as duas fontes, se comparado ao limite estabelecido no Brasil. Para a fonte de emissão localizada na casa de estocagem do alto forno a coque, as técnicas de controle de emissões recomendadas são as mesmas para UE e para o Brasil (Tabela 18). Para a fonte localizada na ala de corrida do alto forno a coque, as técnicas de controle de emissão de MP são semelhantes, diferenciando-se apenas no fato de que o Guia MTPD da CETESB não inclui a técnica de supressão de fumos utilizando nitrogênio durante o vazamento, se aplicável e se não tiver sido instalado um sistema de coleta e despoeiramento das emissões provenientes do vazamento (Tabela 19).

Na ala de corrida do alto-forno, o vazamento do ferro-gusa e da escória pode gerar emissões significativas de particulados, como resultado da alta temperatura e da reação entre o metal

líquido e o oxigênio do ar ambiente. Normalmente, essas emissões são captadas por sistemas de exaustão com filtros, como filtros de mangas ou precipitadores eletrostáticos (Comissão Europeia, 2012b).

No entanto, como técnica adicional, a UE adota a supressão de fumos por meio da injeção de nitrogênio durante o vazamento, reduzindo o contato do ferro-gusa líquido com o oxigênio atmosférico, o que evita a oxidação superficial do metal e, conseqüentemente, a formação de fumos marrons ricos em óxidos de ferro. Com a aplicação desta técnica, as emissões de MP podem ser reduzidas de aproximadamente 0,4 -1,5 kg/t de ferro-gusa para cerca de 0,012 kg/t de ferro-gusa, representando uma diminuição expressiva nas emissões atmosféricas (Comissão Europeia, 2012b). A viabilidade econômica da técnica também já foi demonstrada, com aplicação prática em unidades na Europa, como a planta da ArcelorMittal Bremen, na Alemanha, com investimentos relativamente baixos em comparação aos sistemas convencionais de coleta e despoeiramento (Comissão Europeia, 2012b).

5.1.4 Fontes Fixas da Aciaria LD

O comparativo dos limites de emissão e das MTD recomendadas nos documentos de referência do Brasil e da UE para as fontes da aciaria LD estão apresentados nas Tabelas 20, 21, 22 e 23.

Tabela 20 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para o sistema primário de despoeiramento (combustão incompleta) da aciaria LD.

| Parâmetro | Limites de Emissão (mg/Nm ³) | %O ₂ | Melhores Técnicas Disponíveis |
|---|--|-----------------|---|
| Material Particulado (MP) (Brasil) | 80 | N.A.* | <p>Extrair os gases do conversor, na medida do possível, e limpá-los utilizando as seguintes técnicas em combinação:</p> <ul style="list-style-type: none"> • pré-despoeiramento para eliminar as partículas de maiores dimensões por meio de técnicas de separação a seco (por exemplo, defletor, ciclone) ou de separadores úmidos; • redução das partículas por meio de despoeiramento a seco (por exemplo, precipitador eletrostático) ou despoeiramento por via úmida (por exemplo, lavador). |
| MP (UE) | 10 – 30 | N.A. | <p>Recuperação dos gases do conversor de oxigênio através da combustão reprimida consiste em extrair os gases do conversor de oxigênio, na medida do possível, e limpá-los utilizando as seguintes técnicas em combinação:</p> <p>I. Utilização de um processo de combustão reprimida</p> <p>II. Pré-despoeiramento para eliminar as partículas de maiores dimensões por meio de técnicas de separação a seco (por exemplo, defletor, ciclone) ou de separadores úmidos</p> <p>III. Redução das partículas por meio de:</p> <p>i. despoeiramento a seco (por exemplo, precipitador eletrostático) para instalações novas e instalações existentes.</p> |
| | <50 | N.A. | <p>Recuperação dos gases do conversor de oxigênio através da combustão reprimida consiste em extrair os gases do conversor de oxigênio, na medida do possível, e limpá-los utilizando as seguintes técnicas em combinação:</p> <p>I. Utilização de um processo de combustão reprimida</p> <p>II. Pré-despoeiramento para eliminar as partículas de maiores dimensões por meio de técnicas de separação a seco (por exemplo, defletor, ciclone) ou de separadores úmidos</p> <p>III. Redução das partículas por meio de:</p> <p>ii. despoeiramento por via úmida (por exemplo, lavador ou precipitador eletrostático úmido) para instalações existentes.</p> |

⁽¹⁾ Resolução CONAMA nº 382/2006 (Brasil, 2007) e Guia das Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017).

⁽²⁾ Conclusão sobre as Melhores Técnicas Disponíveis para a produção de ferro e aço (Decisão de Execução UE 2012/135) (Comissão Europeia, 2012a).

* N.A. - Não aplicável.

Fonte: Autora (2025).

Tabela 21 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para o sistema primário de despoeiramento (combustão completa) da aciaria LD.

| Parâmetro | Limites de Emissão (mg/Nm ³) | %O ₂ | Melhores Técnicas Disponíveis |
|--------------------------------------|--|-----------------|---|
| Material Particulado (Brasil) | 80 | N.A.* | Reduzir as emissões de material particulado utilizando uma das seguintes técnicas: • despoeiramento a seco (por exemplo, precipitador eletrostático ou filtro de mangas); • despoeiramento por via úmida (por exemplo, lavador ou precipitador eletrostático úmido). |
| MP (UE) | 10 – 30 | N.A. | Recuperação dos gases do conversor de oxigênio durante a sopragem de oxigênio no caso de combustão completa consiste em reduzir as emissões de partículas utilizando a seguinte técnica: I. Despoeiramento a seco (por exemplo, precipitador eletrostático ou filtro de mangas) para instalações novas e instalações existentes. |
| | <50 | N.A. | Recuperação dos gases do conversor de oxigênio durante a sopragem de oxigênio no caso de combustão completa consiste em reduzir as emissões de partículas utilizando a seguinte técnica: II. Despoeiramento por via úmida (por exemplo, lavador ou precipitador eletrostático úmido) para instalações existentes. |

⁽¹⁾ Resolução CONAMA nº 382/2006 (Brasil, 2007) e Guia das Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017).

⁽²⁾ Conclusão sobre as Melhores Técnicas Disponíveis para a produção de ferro e aço (Decisão de Execução UE 2012/135) (Comissão Europeia, 2012a).

* N.A. - Não aplicável.

Fonte: Autora (2025).

Conforme evidenciado nas tabelas acima, tanto na Resolução CONAMA nº 382/2006 quanto nas Conclusões MTD da UE, não há diferenciação de limites de emissão para a fonte primária no caso de combustão completa e combustão incompleta. Além disso, tanto no Brasil quanto na UE é recomendada a recuperação dos gases gerados no conversor LD por meio de pré-despoeiramento (ciclones ou defletores, por exemplo), seguido de despoeiramento a seco (precipitadores eletrostáticos ou filtros de mangas) ou, alternativamente, despoeiramento por via úmida (lavadores ou precipitadores úmidos) (Tabela 20; Tabela 21).

Contudo, observa-se uma diferença expressiva nos limites de emissão de MP. Enquanto o Brasil adota um limite de 80 mg/Nm³, a UE estabelece limites significativamente mais rigorosos: de 10 a 30 mg/Nm³ para despoeiramento a seco e até 50 mg/Nm³ para sistemas úmidos (Tabela 20; Tabela 21).

Tabela 22 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para o Sistema Secundário de Despoiramento da Aciaria LD.

| Parâmetro | Limites de Emissão (mg/Nm ³) | %O ₂ | Melhores Técnicas Disponíveis |
|---|--|-----------------|--|
| Material Particulado (MP) (Brasil) | 40 | N.A.* | <ul style="list-style-type: none"> • Minimizar as emissões de partículas por meio de técnicas integradas nos processos, tais como técnicas gerais para evitar ou controlar as emissões difusas ou fugas; • Utilização de isolamentos apropriados e coberturas com exaustão eficiente, com subsequente limpeza dos efluentes gasosos por meio de um filtro de mangas ou precipitador eletrostático. |
| | < 1-15 | N.A. | Minimizar as emissões de partículas através de técnicas integradas nos processos, tais como técnicas gerais para evitar ou controlar as emissões difusas ou fugas, e da utilização de isolamentos apropriados e coberturas com extração eficiente, com subsequente limpeza dos efluentes gasosos por meio de um filtro de mangas. |
| MP (UE) | < 20 | N.A. | Minimizar as emissões de partículas através de técnicas integradas nos processos, tais como técnicas gerais para evitar ou controlar as emissões difusas ou fugas, e da utilização de isolamentos apropriados e coberturas com extração eficiente, com subsequente limpeza dos efluentes gasosos por meio de um precipitador eletrostático. |

⁽¹⁾ Resolução CONAMA nº 382/2006 (Brasil, 2007) e Guia das Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017).

⁽²⁾ Conclusão sobre as Melhores Técnicas Disponíveis para a produção de ferro e aço (Decisão de Execução UE 2012/135) (Comissão Europeia, 2012a).

* N.A. - Não aplicável.

Fonte: Autora (2025).

Tabela 23 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para o sistema de despoeiramento da dessulfuração de gusa da aciaria LD.

| Parâmetro | Limites de Emissão (mg/Nm ³) | %O ₂ | Melhores Técnicas Disponíveis |
|---|--|-----------------|--|
| Material Particulado (MP) (Brasil) | 40 | N.A. | <ul style="list-style-type: none"> • Minimizar as emissões de partículas por meio de técnicas integradas nos processos, tais como técnicas gerais para evitar ou controlar as emissões difusas ou fugas ⁽³⁾; • Utilização de isolamentos apropriados e coberturas com exaustão eficiente, com subsequente limpeza dos efluentes gasosos por meio de um filtro de mangas ou precipitador eletrostático ⁽³⁾. |
| MP (UE) | <1-10 ⁽⁴⁾ | N.A. | Minimizar as emissões de partículas através de técnicas integradas nos processos, tais como técnicas gerais para evitar ou controlar as emissões difusas ou fugas, e da utilização de isolamentos apropriados e coberturas com extração eficiente, com subsequente limpeza dos efluentes gasosos por meio de um filtro de mangas. |
| MP (UE) | <20 ⁽⁴⁾ | N.A. | Minimizar as emissões de partículas através de técnicas integradas nos processos, tais como técnicas gerais para evitar ou controlar as emissões difusas ou fugas, e da utilização de isolamentos apropriados e coberturas com extração eficiente, com subsequente limpeza dos efluentes gasosos por meio de um precipitador eletrostático. |

⁽¹⁾ Resolução CONAMA nº 382/2006 (Brasil, 2007) e Guia das Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017).

⁽²⁾ Conclusão sobre as Melhores Técnicas Disponíveis para a produção de ferro e aço (Decisão de Execução UE 2012/135) (Comissão Europeia, 2012a).

⁽³⁾ O Guia da CETESB inclui as emissões do processo de despoeiramento da dessulfuração do gusa no despoeiramento secundário da aciaria LD.

⁽⁴⁾ Limite de emissão associado as melhores técnicas disponíveis no caso das emissões do pré-tratamento do metal quente e da metalurgia secundária serem tratadas separadamente.

* N.A. - Não aplicável.

Fonte: Autora (2025).

Os limites europeus de emissão de MP para o sistema de despoeiramento secundário e para o despoeiramento da dessulfuração de gusa da aciaria LD também são mais rigorosos do que os limites brasileiros, conforme é possível observar nas Tabelas 22 e 23. A Resolução CONAMA nº 382/2006 estabelece um limite de 40 mg/Nm³, enquanto a UE impõe limites de <1 a 15 mg/Nm³ para sistemas com filtros de mangas e < 20 mg/Nm³ para sistemas com precipitadores eletrostáticos (Tabela 22). Na dessulfuração de gusa, observa-se a mesma tendência: o Brasil mantém o limite de 40 mg/Nm³. A UE, por sua vez, estabelece dois níveis: <1 a 10 mg/Nm³ para sistemas com filtros de mangas e < 20 mg/Nm³ para sistemas com precipitadores eletrostáticos (Tabela 23). Para ambas as fontes da aciaria LD, o Guia CETESB e as Conclusões

MTD da UE recomendam sistemas de controle de emissões semelhantes (Tabela 22; Tabela 23).

5.1.5 Fonte Fixa da Laminação a Quente

Na Tabela 20 é apresentada a comparação entre os limites de emissão e as MTD recomendadas nos documentos de referência do Brasil e da UE para os fornos de reaquecimento de placas com queima de gases siderúrgicos da laminação a quente.

Tabela 24 - Comparativo dos limites de emissão e das melhores técnicas disponíveis recomendadas nos documentos de referência do Brasil ⁽¹⁾ e da União Europeia (UE) ⁽²⁾ para os fornos de reaquecimento de placas com queima de gases siderúrgicos da laminação a quente.

| Parâmetro | Limites de Emissão (mg/Nm ³) | %O ₂ | Melhores Técnicas Disponíveis |
|---|--|-----------------|--|
| Material Particulado (MP) (Brasil) | 50 | 7% | Evitar excedentes de ar e perdas de calor durante o carregamento, por meio de medidas operacionais (abertura das portas o mínimo necessário para a operação de carregamento) ou de meios estruturais (instalação de portas multissegmentadas para se obter um fecho mais estanque). |
| | 64 | 3% | |
| MP (UE) | < 2-10 | 3% | <p>Uso de eletricidade produzida a partir de fontes de energia não fósseis ou da técnica a., em combinação com a técnica b., conforme indicado a seguir:</p> <p>a. Utilização de combustíveis com baixo teor de partículas e de cinzas (entre os combustíveis com baixo teor de partículas e de cinzas incluem-se, por exemplo, o gás natural, o gás liquefeito de petróleo, os gases de alto-forno despoeirados e os gases do conversor de oxigênio despoeirados) → aplicabilidade geral.</p> <p>b. Limitação do arrastamento de partículas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - a limitação do arrastamento de partículas efetua-se, por exemplo, pelas seguintes vias: tanto quanto possível, utilização de carga limpa ou limpeza da carga para remover a calamina e as partículas soltas antes de a introduzir no forno - minimização da produção de partículas devida a danos provocados no revestimento refratário, por exemplo evitando o contato direto das chamas com o revestimento refratário, utilizando revestimentos cerâmicos neste último; - evitar o contato direto da chama com a carga → não é aplicável no caso dos fornos de chama direta. |
| Dióxido de Enxofre (SO₂) (Brasil) | 800 | 7% | Escolha cuidadosa do combustível e implementação de sistemas de automatização/controle dos fornos para otimizar as condições de aquecimento para o gás natural e misturas gasosas. |
| | 1.029 | 3% | |

| Parâmetro | Limites de Emissão (mg/Nm ³) | %O ₂ | Melhores Técnicas Disponíveis |
|--|--|-----------------|---|
| SO ₂ (UE) | < 50-200* | 3% | <p>Uso de eletricidade produzida a partir de fontes de energia não fósseis ou de um combustível, ou de uma combinação de combustíveis, com baixo teor de enxofre → entre os combustíveis com baixo teor de enxofre incluem-se, por exemplo, o gás natural, o gás liquefeito de petróleo, o gás de alto-forno, o gás de conversor de oxigênio e o gás rico em CO resultante da produção de ferrocromo.</p> <p>O VEA-MTD não se aplica a instalações que utilizem 100 % de gás natural ou 100 % de aquecimento elétrico.</p> <p>* O limite superior do intervalo do VEA-MTD pode ser mais elevado (até 300 mg/Nm³) se utilizar uma percentagem elevada de gás de coque (> 50 % da alimentação de energia).</p> |
| Óxidos de Nitrogênio (NO _x) (como NO ₂) (Brasil) | 700 | 7% | <ul style="list-style-type: none"> • Recuperação de calor dos gases residuais, com temperatura acima de 350°C, por meio de pré-aquecimento do material de alimentação; • Recuperação do calor dos gases residuais, com temperatura acima de 350°C, por meio de sistemas de queimadores equipados com regeneradores ou recuperadores; • Recuperação do calor dos gases residuais, com temperatura acima de 350°C, por meio de uma caldeira de recuperação ou de um sistema de arrefecimento; • Queimadores do tipo LowNO_x; • Limitação da temperatura de pré-aquecimento do ar. |
| | 900 | 3% | |
| NO _x (como NO ₂) (UE) | 100-350** | 3% | <p>Uso de eletricidade produzida a partir de fontes de energia não fósseis ou de uma combinação adequada das técnicas indicadas:</p> <p>Redução da produção de emissões:</p> <ol style="list-style-type: none"> a) Utilização de um combustível ou de uma combinação de combustíveis com baixo potencial de formação de NO_x; b) Sistema de automatização e de controlo do forno; c) Otimização da combustão; d) Queimadores de baixas emissões de NO_x; e) Recirculação de gases de combustão; f) Limitação da temperatura de pré-aquecimento do ar; g) Combustão sem chama; h) Combustão oxi-combustível. <p>Tratamento dos efluentes gasosos:</p> <ol style="list-style-type: none"> i) Redução catalítica seletiva (RCS); j) Redução não catalítica seletiva (RNCS); k) Otimização da conceção e do funcionamento da RNCS/RCS. |

⁽¹⁾ Resolução CONAMA n° 382/2006 (Brasil, 2007) e Guia das Melhores Tecnologias Práticas Disponíveis da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017).

⁽²⁾ Conclusão sobre as Melhores Técnicas Disponíveis para o processamento de metais ferrosos (Decisão de Execução (UE) 2022/2110 da Comissão) (Comissão Europeia, 2022a).

* O limite superior do intervalo do VEA-MTD pode ser mais elevado (até 300 mg/Nm³) se utilizar uma percentagem elevada de gás de coque (> 50 % da alimentação de energia).

** O limite superior do intervalo pode ser mais elevado (até 550 mg/Nm³) se se utilizar uma percentagem elevada de gás de coque ou de gás rico em CO resultante da produção de ferrocromo (> 50 % da alimentação de energia).

Fonte: Autora (2025).

O limite brasileiro para MP é de 64 mg/Nm³ a 3% de oxigênio, enquanto o europeu varia entre < 2–10 mg/Nm³ (Tabela 24). No que tange às técnicas recomendadas, no documento de referência do Brasil são indicadas medidas operacionais básicas, como manter as portas dos fornos fechadas ou aplicar melhorias estruturais simples para evitar perdas de calor. Já a UE propõe uma abordagem mais robusta, que inclui o uso de combustíveis com baixo teor de partículas e cinzas, limpeza da carga para remoção de partículas soltas e proteção do revestimento refratário contra o contato direto da chama. Essa variedade de intervenções mostra uma preocupação não apenas com a eficiência térmica, mas com o controle físico-químico da geração de partículas desde a origem do processo térmico (Tabela 24).

Para o SO₂, o Brasil estabelece um limite de 800 mg/Nm³ a 7% de O₂, que, convertido 3% de O₂, equivale a 1.029 mg/Nm³. A UE estabelece valores de emissão entre 50 e 200 mg/Nm³ (com exceções até 300 mg/Nm³) (Tabela 24). No que tange às técnicas de controle recomendadas, a legislação brasileira sugere principalmente a “escolha cuidadosa do combustível” e a automatização do controle dos fornos para otimizar a combustão. Embora válidas, essas medidas se mantêm no campo da eficiência operacional, sem exigir mudanças estruturais ou tecnológicas mais robustas. Por outro lado, o documento da UE avança ao sugerir a utilização de eletricidade ou de combustíveis de baixo teor de enxofre, como gás natural, gás liquefeito de petróleo (GLP) ou gases despoeirados da própria siderurgia (Tabela 24). Isso demonstra não apenas uma preocupação com a eficiência da queima, mas com a natureza do insumo energético, reconhecendo que a qualidade do combustível é o principal fator determinante das emissões de SO₂.

O limite de emissão de NO_x na norma brasileira é de 900 mg/Nm³, considerando o ajuste a um percentual de 3% de oxigênio, enquanto a UE estabelece uma faixa de emissão de 100 a 350 mg/Nm³, podendo chegar a 550 mg/Nm³ sob condições específicas (Tabela 24). O Brasil recomenda queimadores LowNO_x e recuperação de calor. A UE sugere um conjunto técnico robusto, com otimização da combustão, recirculação de gases, combustão sem chama, e técnicas de pós-tratamento como a redução catalítica seletiva (RCS) e a redução não catalítica seletiva (RNCS) (Tabela 24). A amplitude de soluções na norma europeia reflete uma maior complexidade na gestão de NO_x, considerando os aspectos preventivos e corretivos do processo.

Uma possível justificativa para as diferenças observadas entre as técnicas recomendadas nas Conclusões MTD e aquelas listadas no Guia da CETESB para os fornos de reaquecimento da laminação a quente pode estar relacionada ao período em que cada documento foi elaborado e publicado. O documento com as Conclusões MTD específicas para a produção de ferro e aço foi publicado em 2022, enquanto, o Guia MTPD da CETESB foi publicado em 2015. Essa defasagem de sete anos é significativa, de modo que é esperado que o documento europeu traga soluções mais abrangentes e inovadoras, enquanto o Guia brasileiro permaneça focado em medidas operacionais e práticas de eficiência térmica. Portanto, o fator cronológico pode explicar, ao menos em parte, por que as recomendações brasileiras ainda não incorporaram integralmente o estado mais avançado da técnica adotado internacionalmente.

6 DISCUSSÃO

A análise comparativa realizada neste trabalho evidencia diferenças significativas no nível de rigor regulatório entre o Brasil e a UE, no que se refere aos limites de poluentes atmosféricos na indústria siderúrgica.

O conceito de MTD é amplamente utilizado na área ambiental dos países da UE (Loubet; Portugal, 2024). A Diretiva de Emissões Industriais - que é o principal instrumento de regulação das emissões poluentes para o ar, a água e o solo - exige que as licenças para instalações industriais estejam condicionadas ao cumprimento de limites de emissão atmosféricas de fontes fixas associado as MTD (Comissão Europeia, 2021; Loubet; Portugal, 2024).

Segundo o Plano de Ação da UE: “*Rumo à poluição zero no ar, na água e no solo*”, elaborado pela Comissão Europeia, o atendimento obrigatório aos VEA-MTD tem proporcionado significativa redução nas emissões industriais europeias. Atualmente, por exemplo, grandes instalações de combustão na UE emitem sete vezes menos poluentes atmosféricos do que há vinte anos. Entretanto, ainda assim, as emissões atmosféricas remanescentes continuam gerando expressivos custos econômicos e sociais, estimados em aproximadamente 100 bilhões de euros ao ano, o que reforça a necessidade de continuidade dos esforços para reduzir as emissões (Comissão Europeia, 2021). Este dado evidencia a urgência de aumentar a exigência a nível nacional no Brasil, no que tange às emissões de poluentes atmosféricos, incluindo a emissão de poluentes atmosféricos de fontes fixas.

O Brasil enfrenta historicamente limitações que dificultam a implementação de regulações ambientais equivalentes em rigor e abrangência. Isso é evidenciado nos estudos de Blackman e Harrington (1999), que ressaltam as dificuldades enfrentadas por países em desenvolvimento na implementação e monitoramento de regulamentações ambientais rigorosas, devido às limitações financeiras, institucionais e políticas.

No Brasil, a aplicação das MTD não possui obrigatoriedade legal expressa e geral, sendo pouco estudado ou aplicado (Loubet; Portugal, 2024). Embora o conceito apareça de forma dispersa na legislação e muitas vezes de forma implícita, vinculado à adoção obrigatória de avanços técnicos e tecnológicos, não há uma regulamentação ampla e sistemática sobre o tema (Loubet; Portugal, 2024).

Com base nos princípios constitucionais e legais do sistema brasileiro, no entanto, é possível afirmar que existe um princípio implícito que obriga a adoção das MTD no contexto do Direito Ambiental Brasileiro. A Lei da Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/81), por exemplo, estabelece como princípio a necessidade de estímulo ao desenvolvimento de tecnologias sustentáveis (Loubet; Portugal, 2024).

Apesar disso, a Resolução CONAMA nº 382/2006 adota um modelo regulatório distinto da UE, fixando limites máximos de emissão de poluentes desvinculados das tecnologias específicas de controle. Desta forma, é possível que as empresas atendam aos limites legais mesmo com tecnologias de controle menos eficientes em comparação às melhores práticas atualmente disponíveis e recomendadas no cenário nacional e internacional. Percebe-se, também que, os limites de emissão se mantêm os mesmos desde 2007, quando a norma foi publicada. Ou seja, mesmo com o aprimoramento e desenvolvimento das técnicas de controle e redução de emissões mais eficientes que possibilitam limites de emissões mais restritivos, a norma brasileira não se atualizou.

Essa diferença normativa fica evidente na comparação dos limites de emissão de todos os parâmetros listados na Resolução CONAMA nº 382/2006 para fontes fixas de usinas siderúrgicas integradas, cujos limites estabelecidos pela legislação brasileira são substancialmente mais elevados que os limites europeus. Conforme evidenciado na Tabela 24, há fontes que o limite de emissão de MP na UE é seis vezes mais restritivo que o limite de emissão brasileiro.

Vale ressaltar, que, mais recentemente, foi sancionada a Lei Federal nº 14.850/24, que institui a Política Nacional da Qualidade do Ar. Esta Lei, em seu artigo 10, prevê a consideração das melhores práticas e tecnologias disponíveis para a determinação dos limites máximos de emissão para controle das fontes poluidoras (Brasil, 2024). No entanto, essa legislação ainda carece de regulamentação específica e não estabelece um sistema robusto de implementação das MTD, como ocorre com os BREFs europeus.

Justamente pela ausência de um documento equivalente ao BREF no Brasil que o presente trabalho utilizou como base de comparação o Guia de MTPD elaborado pela CETESB. Embora não possua caráter normativo, esse Guia funciona como um instrumento técnico orientativo,

fornecendo uma sistematização de técnicas consolidadas para o controle de emissões atmosféricas em diversos setores industriais. Dessa forma, representa uma iniciativa relevante para preencher, ao menos parcialmente, a lacuna existente na regulamentação brasileira, oferecendo suporte técnico e metodológico ao processo de licenciamento ambiental nos estados, ainda que careça de institucionalização a nível federal.

No que tange ao controle e redução de emissões provenientes de fontes fixas em usinas siderúrgicas integradas a coque, observa-se que as técnicas recomendadas no Guia de MTPD da CETESB e nas Conclusões sobre as MTD da UE são bastante semelhantes, com exceção das técnicas indicadas na etapa de laminação. O próprio documento da CETESB reconhece o uso das referências europeias como base técnica.

No entanto, o fato de grande parte das recomendações terem sido transpostas diretamente das Conclusões MTD, sem adaptações à realidade nacional, evidencia possíveis limitações quanto à sua aplicabilidade no contexto brasileiro. Isso porque, os BREFs europeus - que são a base para a consolidação das Conclusões MTD - tanto os voltados à produção de ferro e aço quanto os aplicáveis ao processamento de metais ferrosos, são elaborados a partir da coleta e análise de dados reais de desempenho técnico e ambiental de indústrias localizadas na União Europeia ou em países do Espaço Econômico Europeu (Comissão Europeia, 2012c). Com isso, siderúrgicas brasileiras não foram consideradas na definição das técnicas recomendadas nem nos valores-limite de emissão associados, o que pode inviabilizar a aplicabilidade destas técnicas no contexto nacional.

A necessidade de adequação das MTD à realidade brasileira torna-se evidente no artigo 10 da Lei Federal nº 14.850/24, que estabelece a necessidade de considerar a viabilidade técnica, econômica e financeira das práticas e tecnologias disponíveis na definição dos limites máximos de emissão para o controle de fontes poluidoras (Brasil, 2024). Nesse contexto, a mera transposição das MTD europeias, sem a devida contextualização às particularidades nacionais, configura uma limitação relevante. Aspectos como a infraestrutura industrial instalada, os custos de implementação e o nível de maturidade tecnológica das indústrias brasileiras podem diferir do cenário europeu. A desconsideração dessas variáveis pode comprometer tanto a

eficácia das medidas propostas quanto a sua efetiva aplicação pelo setor produtivo, evidenciando a necessidade de uma abordagem regulatória mais alinhada às condições locais.

Nesse contexto, a discrepância entre os limites de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas na indústria siderúrgica brasileira e os parâmetros mais restritivos adotados pela UE podem ser parcialmente explicados pelas diferenças estruturais e tecnológicas entre os dois contextos econômicos. A estrutura produtiva brasileira, caracterizada por uma elevada heterogeneidade e presença significativa de setores de baixa e média-baixa intensidade tecnológica, impõe desafios adicionais à adoção de tecnologias ambientalmente mais avançadas (Manusetto, 2009).

Essa limitação reflete um padrão mais amplo observado em países da América Latina e do Caribe. Segundo a Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL, 2016), o modelo de desenvolvimento predominante na região tem gerado impactos negativos, como a persistência de brechas tecnológicas, de produtividade e de renda em relação às economias avançadas, além da limitada difusão de inovações tanto entre os países quanto internamente.

Por outro lado, a adoção de um modelo de desenvolvimento sustentável apresenta potencial para reverter esse quadro, ao incentivar a diversificação produtiva, o fortalecimento de capacidades nacionais e o avanço em direção a setores de maior conteúdo tecnológico. No entanto, para que essa transição ocorra de forma efetiva, é fundamental a implementação de um conjunto articulado de investimentos complementares, o que representa um desafio considerável diante das fragilidades institucionais e dos déficits de coordenação e planejamento historicamente presentes na região (CEPAL, 2016).

A superação dessas brechas tecnológicas é crucial não apenas para ampliar a competitividade e a resiliência dos países em desenvolvimento, mas também para assegurar a provisão de bens públicos globais, como a proteção ambiental e a estabilidade econômica. Na ausência de mecanismos eficazes de governança internacional que promovam a difusão de capacidades tecnológicas, normas ambientais mais rígidas podem, na prática, funcionar como barreiras não tarifárias, dificultando a inserção desses países em mercados exigentes e agravando as desigualdades globais (CEPAL, 2016).

Vale destacar que, além das técnicas de controle de emissões tradicionalmente aplicadas, outras modificações no processo siderúrgico também podem contribuir significativamente para a redução da carga de poluentes atmosféricos. O estudo de Xin *et al.* (2023), baseado em uma usina siderúrgica localizada na China, evidenciou que a implementação de tecnologias de conservação de energia e redução de emissões, a reestruturação da produção com forno elétrico a arco, a substituição de fontes energéticas e a integração tecnológica resultou em uma redução do consumo total de energia na ordem de 7%, 11,2%, 10,5% e 22,7%, respectivamente, até o ano de 2035. À medida que se reduzem a produção e o consumo energético, observou-se uma tendência contínua nas reduções das emissões como MP, SO₂, NO_x, CO e COVs.

Dessa forma, nota-se que a indústria siderúrgica brasileira, devido à sua expressiva relevância econômica e ao elevado potencial de emissão de poluentes, vem sendo crescentemente pressionada a modernizar suas plantas com maior responsabilidade socioambiental. Essa demanda não se configura apenas como uma exigência regulatória, mas também como uma estratégia competitiva essencial para a manutenção da posição da indústria no mercado internacional (Araújo, 2021).

A responsabilidade ambiental como uma estratégia competitiva de mercado é evidenciada, por exemplo, pelo Plano de Ação “Rumo à Poluição Zero” da UE, que estabelece metas ambiciosas para 2050, como a redução da poluição atmosférica a níveis que não causem mais impactos nocivos à saúde humana e aos ecossistemas. Esse plano reforça que o cumprimento dessas metas será incorporado progressivamente em acordos comerciais, condicionando o acesso ao mercado europeu a padrões ambientais mais rígidos (Comissão Europeia, 2021).

Outro exemplo que ressalta a importância do alinhamento as normas internacionais é o Regulamento da Taxonomia (Regulamento (UE) 2020/852). Este Regulamento, em vigor desde 2021 na União Europeia, fornece uma definição comum para identificar atividades econômicas ambientalmente sustentáveis, com o objetivo de padronizar a definição de “sustentável” no contexto europeu (Comissão Europeia, 2020).

Esse regulamento elenca seis objetivos ambientais e determina que uma atividade econômica será considerada ambientalmente sustentável se contribuir substancialmente para pelo menos um desses objetivos, sem causar prejuízos significativos aos demais. Além disso, a atividade

deve respeitar salvaguardas sociais mínimas e atender aos critérios técnicos de triagem definidos nos atos delegados vinculados ao regulamento (Comissão Europeia, 2020).

Entre os objetivos estabelecidos, destaca-se a prevenção e o controle da poluição, diretamente relevante para a análise de atividades industriais como a siderurgia. Para atender ao critério de “não causar prejuízo significativo” em relação a esse objetivo, as atividades de produção de aço devem, independentemente da capacidade instalada, manter suas emissões dentro ou abaixo dos intervalos estabelecidos pelas MTD, conforme as conclusões mais recentes e pertinentes sobre o tema, incluindo as Conclusões MTD da União Europeia (Comissão Europeia, 2023).

O regulamento impõe obrigações de divulgação às empresas sujeitas à publicação de informações não financeiras, exigindo que também relatem dados relacionados à Taxonomia (Comissão Europeia, 2022c). Essas exigências estendem-se a empresas-mãe de fora da UE que tenham receita anual na UE igual ou superior a 150 milhões de euros nos dois exercícios mais recentes e que possuam: uma grande empresa sediada na UE; uma subsidiária com ações cotadas em bolsas reguladas da UE; ou uma filial com faturamento líquido mínimo de 40 milhões de euros (IBM, 2023).

Dessa forma, o fato de o Brasil adotar limites de emissão significativamente mais permissivos, do que os VEA-MTD da União Europeia, pode representar um obstáculo para que siderúrgicas brasileiras sejam enquadradas como sustentáveis segundo os critérios do Regulamento da Taxonomia da União Europeia. Isso porque, o cumprimento dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 382/2006 não assegura que essas indústrias atendam aos padrões exigidos pela legislação europeia.

7 CONCLUSÕES

A análise comparativa entre os limites de emissão atmosférica e as técnicas de controle recomendadas para fontes fixas na indústria siderúrgica no Brasil e na UE evidencia disparidades significativas no campo normativo e técnico. A UE adota limites de emissão mais rigorosos, baseando-se nas MTDs como critério vinculante para o licenciamento. Em contraste, o Brasil ainda opera com limites mais permissivos, desvinculados das técnicas de controle aplicadas, além de contar com diretrizes técnicas orientativas, como o Guia MTPD da CETESB, que não possuem força normativa. Essa lacuna permite a adoção de tecnologias menos eficazes, comprometendo o desempenho ambiental e a competitividade internacional da indústria brasileira.

A adoção de normas mais exigentes, aliada ao incentivo à utilização de técnicas de redução e controle de emissões, se mostra estratégica para que as siderúrgicas brasileiras possam atender a requisitos internacionais, acessar mercados mais exigentes e melhorar sua reputação ambiental. Tal avanço também beneficiaria a imagem do país como um agente comprometido com a sustentabilidade.

As disparidades identificadas evidenciam, ainda, desafios estruturais e institucionais, como a ausência de um instrumento nacional equivalente aos BREFs europeus e a não obrigatoriedade na aplicação das MTDs. Nesse contexto, destaca-se a necessidade de uma política pública federal robusta que consolide as MTDs como referência técnica e jurídica para a definição de limites de emissão. A recente criação da Política Nacional da Qualidade do Ar (Lei nº 14.850/2024) representa um avanço importante, embora sua eficácia dependa da elaboração de regulamentações específicas e da implementação de mecanismos adequados de governança.

O estudo demonstra que, além dos entraves normativos, a fragilidade institucional e as limitações de recursos representam obstáculos relevantes à transição para práticas mais sustentáveis. Essa conjuntura compromete não apenas a proteção ambiental, mas também a inserção competitiva da siderurgia integrada a coque no cenário internacional, cada vez mais regulado e exigente.

Conclui-se, portanto, que a elevação dos padrões ambientais na indústria siderúrgica brasileira exige a adoção de uma agenda regulatória mais rigorosa, alinhada a incentivos à inovação

tecnológica, à modernização das unidades produtivas e ao fortalecimento da governança ambiental. A harmonização com os referenciais internacionais, como os MTD-BREFs da União Europeia, apresenta-se como um caminho promissor para elevar a qualidade ambiental da produção siderúrgica, respeitando as especificidades do contexto nacional.

Assim, a modernização regulatória e tecnológica da siderurgia integrada a coque no Brasil, com base na institucionalização das MTDs, não deve ser vista apenas como uma exigência ambiental, mas como uma oportunidade estratégica de posicionamento no mercado internacional.

8 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, Mansueto. **Desafios da real política industrial brasileira do século XXI**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2009. (Texto para Discussão, n. 1452).

ARAÚJO, Igor Saraiva de. **Produção brasileira de aço bruto: evolução e determinantes da competitividade internacional da siderurgia nacional**. 2021. 160 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharel (Relações Internacionais) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/2219>. Acesso em: 21 mai. 2025.

BOLOTA, José Roberto (Coord.). **Siderurgia: uma visão geral**. São Paulo: Blucher, 2024. ISBN 978-85-212-2329-0.

BLACKMAN, Allen. **Alternative pollution control policies in developing countries: informal, informational, and voluntary**. Washington: Resources for the Future, 2009. (RFF Discussion Paper 09-10). Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1093/reep/req005>.

BLACKMAN, Allen; HARRINGTON, Winston. **The use of economic incentives in developing countries: lessons from international experience with industrial air pollution**. The Journal of Environment & Development. Vol. 9, No. 1 (March 2000), pp. 5-44 (40 pages).

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006**. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 jan. 2007. Seção 1, p. 81.

BRASIL. **Lei nº 14.850, de 2 de maio de 2024**. Institui a Política Nacional de Qualidade do Ar. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil03/ato2023-2026/2024/lei/L14850.htm>. Acesso em: 19 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de ferro-gusa e aço**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações; ONU Meio Ambiente, 2017. 166 p. (Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil). ISBN 978-85-88063-45-7.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. de. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 41, mar. 2015.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Guia de Melhor Tecnologia Prática Disponível (MTPD)**. Plano de Redução de Emissões de Fontes Estacionárias (PREFE). São Paulo: CETESB, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2015/09/GUIA-PREFE-020517.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2024.

COMISSÃO ECONÔMICA PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE (CEPAL). **Horizontes 2030: a igualdade no centro do desenvolvimento sustentável**. Santiago: Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe, 2016. (LC/G.2660/Rev.1).

COMISSÃO EUROPEIA. **Diretiva 2010/75/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de novembro de 2010**: relativa às emissões industriais (prevenção e controlo integrados da poluição). *Jornal Oficial da União Europeia*, L 334, p. 17–119, 2010. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075>. Acesso em: 1 out. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. **Decisão de Execução (UE) 2012/135 da Comissão, de 28 de fevereiro de 2012**: adota as conclusões sobre as melhores técnicas disponíveis (MTD) para a produção de ferro e aço ao abrigo da Diretiva 2010/75/UE. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 70, p. 63–81, 2012a. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32012D0135>. Acesso em: 9 nov. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. **Documento de Referência sobre as Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) para a Produção de Ferro e Aço – BREF**. Sevilha: European IPPC Bureau, 2012b. 1 v. (JRC Reference Report; EUR 25521 EN).

COMISSÃO EUROPEIA. **Regulamento (UE) 2020/852 do Parlamento Europeu e do Conselho**, de 18 de junho de 2020. Estabelece um quadro para facilitar investimentos sustentáveis e altera o Regulamento (UE) 2019/2088. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 198, p. 13-43, 2020. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32020R0852>. Acesso em: 16 jan. 2025.

COMISSÃO EUROPEIA. **Plano de ação da UE: rumo à poluição zero no ar, na água e no solo**. Bruxelas: Comissão Europeia, 2021. Disponível em: eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0400. Acesso em: 21 jun. 2025.

COMISSÃO EUROPEIA. **Decisão de Execução (UE) 2022/2110 da Comissão, de 11 de outubro de 2022**: estabelece as conclusões relativas às melhores técnicas disponíveis (MTD) para a indústria de processamento de metais ferrosos, conforme a Diretiva 2010/75/UE. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 284, p. 69–71, 2022a. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32022D2110>. Acesso em: 9 nov. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. **Novas normas ambientais da UE para reduzir o impacto das plantas de processamento de metais ferrosos**. Joint Research Centre, 2022b. Disponível em: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/new-eu-environmental-norms-reduce-impact-ferrous-metals-processing-plants-2022-11-04_en. Acesso em: 22 jan. 2025.

COMISSÃO EUROPEIA. **Comunicação da comissão sobre a interpretação de certas disposições jurídicas do Regulamento Delegado Divulgação de Informações nos termos do artigo 8.º do Regulamento Taxonomia da UE relativo à comunicação de informações sobre atividades económicas e ativos elegíveis**. *Jornal Oficial da União Europeia*, Bruxelas,

C 385, 2022c. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=OJ:C:2022:385:FULL>. Acesso em: 24 jun. 2025.

COMISSÃO EUROPEIA. **Comunicação da Comissão – Orientações técnicas sobre a aplicação do princípio de “não prejudicar significativamente” ao abrigo do Regulamento relativo ao Mecanismo de Recuperação e Resiliência**. Jornal Oficial da União Europeia, C 267, 21 jul. 2023. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=OJ:C_202300267#ntr6-C_202300267PT.000101-E0006. Acesso em: 24 jun. 2025.

CSN – COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. **Minério de ferro**. [S. l.], 2024. Disponível em: [https://www.csn.com.br/homepage/minerio-de-ferro/#:~:text=Sinter%20Feed%20\(6.3mm%2D0.150,feed%20CSN%20Minera%C3%A7%C3%A3o%20supera%2063%25](https://www.csn.com.br/homepage/minerio-de-ferro/#:~:text=Sinter%20Feed%20(6.3mm%2D0.150,feed%20CSN%20Minera%C3%A7%C3%A3o%20supera%2063%25). Acesso em: 7 abr. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Nota Técnica DEA 02/09: caracterização do uso da energia no setor siderúrgico brasileiro**. Rio de Janeiro: EPE, abr. 2009.

IBM. **O que é a Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD)**. 2024. Disponível em: <<https://www.ibm.com/br-pt/topics/csr-d>>. Acesso em: 25 out. 2024.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Mercado Brasileiro de Aço: Análise Setorial e Regional 2024**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking**. Paris: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>. Acesso em: 13 jan. 2025.

LOUBET, Sonia Regina; PORTUGAL, Sebastião Vieira. **Melhores Técnicas Disponíveis (MTD): uma proposta para o controle da poluição industrial no Brasil**. Revista do Ministério Público do RS, Porto Alegre, n. 96, jul. 2024 – dez. 2024.

MOURÃO, Marcelo Breda (coord.). **Introdução à siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2007. ISBN 85-7737-015-1.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 59.113, de 23 de abril de 2013. **Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas**. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html>. Acesso em: 15 dez. 2024.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). AP-42, **Compilation of Air Pollutant Emission Factors: Chapter 12 – Metallurgical Industry, Section 12.5 – Iron and Steel Production**. [S. l.]: EPA, 2008. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch12/final/c12s05.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2025.

WANG, X., LEI, Y., YAN, L., LIU, T., ZHANG, Q., HE, K. **A Unit-Based Emission Inventory of SO₂, NO_x and PM for the Chinese Iron and Steel Industry from 2010 to 2015**. *Science of the Total Environment*, v. 676, 2019. Disponível em: Wang et al. (2019).pdf. Acesso em: 06 jan. 2025.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Air Quality: Emissions to Air from Steel Industry**. 2020. Disponível em: <https://worldsteel.org/wider-sustainability/air-quality/>. Acesso em: 13 jan. 2025.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The Global Risks Report 2024**. Genebra: WEF, 2024. Disponível em: <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2024/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

WU, X., ZHAO, L., ZHANG, Y., ZHENG, C., GAO X., CEN, K. **Primary Air Pollutant Emissions and Future Prediction of Iron and Steel Industry in China**. *Aerosol and Air Quality Research*, v. 15, p. 1422-1432, 2015. Disponível em: <https://aaqr.org/articles/aaqr-15-01-0a-0029>. Acesso em: 06 jan. 2025.

XIN, H., WANG, S., CHUM, T., XUE, X., LONG, W., XUE, R., ZHANG, R. **Effective pathways for energy conservation and emission reduction in iron and steel industry towards peaking carbon emissions in China: case study of Henan**. *Journal of Cleaner Production*, v. 399, 136637, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136637>. Acesso em: 25 jun. 2025.

YU, J., XU, R., ZHANG, J., ZHENG, A. **A Review on Reduction Technology of Air Pollutant in Current China's Iron and Steel Industry**. *Journal of Cleaner Production*, v. 414, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623018176>. Acesso em: 06 jan. 2025.