

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE PRODUTOS E
PROCESSOS

Stefane Souza Silva Caldeira

Economia circular e descarbonização na Siderurgia:
Avaliação do ciclo de vida da gaseificação do
resíduo *fluff* como substituto ao gás natural

BELO HORIZONTE

2025

Stefane Souza Silva Caldeira

**Economia circular e descarbonização na Siderurgia:
Avaliação do ciclo de vida da gaseificação do
resíduo *fluff* como substituto ao gás natural**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Produtos e Processos.

Orientador: Profa. Dra. Patrícia Sueli de Rezende
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Coorientador: Dr. Julio L. Rivera
Centro de Pesquisa da ArcelorMittal Maizières

Coorientador: M.Sc. Leonardo Guimaraes Ribeiro
Centro de Pesquisa da ArcelorMittal Maizières

BELO HORIZONTE

2025

Caldeira, Stefane Souza Silva.
C146e Economia circular e descarbonização na siderurgia : avaliação do ciclo de vida da gaseificação do resíduo *fluff* como substituto ao gás natural / Stefane Souza Silva Caldeira. – 2025.
122 f. : il.
Orientadora: Patrícia Sueli de Rezende.
Coorientador: Julio L. Rivera.
Coorientador: Leonardo Guimarães Ribeiro.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, Belo Horizonte, 2025.
Bibliografia.
1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Economia circular. 3. Transição energética. 4. Resíduos industriais. 5. Gaseificação. 6. Siderurgia. I. Rezende, Patrícia Sueli de. II. Rivera, Julio L. III. Ribeiro, Leonardo Guimarães. IV. Título.

CDD: 665.776

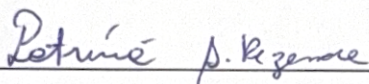
STEFANE SOUZA SILVA CALDEIRA

**ECONOMIA CIRCULAR E DESCARBONIZAÇÃO NA SIDERURGIA: AVALIAÇÃO
DO CICLO DE VIDA DA GASEIFICAÇÃO DO RESÍDUO FLUFF COMO
SUBSTITUTO AO GÁS NATURAL**

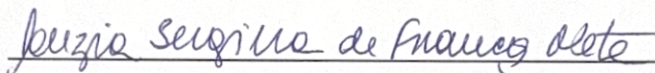
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Produtos e Processos.

Belo Horizonte, 01 de setembro de 2025.

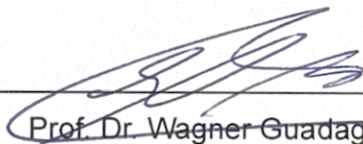
Aprovada pela Banca Examinadora:



Prof.^a Dr.^a Patricia Sueli de Rezende (Orientadora)



Prof.^a Dr.^a Luzia Sergina de França Neta



Prof. Dr. Wagner Guadagnin Moravia



Prof. Dr. Guilherme Correa Abreu

Agradecimentos

A Deus, pela vida, pela força e pela sabedoria concedida em todos os momentos desta caminhada.

À minha família, pelo amor incondicional que sempre me sustentou. Aos meus pais, por todo incentivo e exemplo de dedicação, e aos meus irmãos, pelo companheirismo e apoio.

À Luciana Magalhães, pela compreensão e incentivo nos momentos mais desafiadores, e ao Wesley Cavalcante, pela valiosa parceria.

À minha orientadora, Professora Patricia Rezende, por todo o suporte, dedicação e ensinamentos compartilhados, e aos meus coorientadores, Julio Riveira e Leonardo Guimarães, pela orientação, disponibilidade e contribuições essenciais para este trabalho.

À empresa SEE Brasil responsável pelo teste piloto, em especial à Ana Lúcia Bertolazzi, Patrick Magem e Leonardo Silva, pelo suporte e pelo fornecimento de informações fundamentais relacionadas ao uso de suas tecnologias.

Ao Diego Magalhães e à Thalya Vieira, pelo apoio com *software* SimaPro e pela assistência técnica imprescindível na aplicação da metodologia de ACV em coprodutos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos do CEFET-MG, pela oportunidade de desenvolvimento acadêmico e profissional.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação, deixo o meu sincero agradecimento.

RESUMO

A indústria do aço, responsável por cerca de 7 a 9% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEEs), enfrenta o desafio de promover estratégias de descarbonização em seus processos. Nesse contexto, o uso de sucata metálica como matéria-prima contribui para reduzir a demanda por minério de ferro e diminuir as emissões associadas. Essa sucata pode ter origem no setor automotivo e em outros segmentos industriais, e seu beneficiamento para consumo nas usinas siderúrgicas gera um resíduo conhecido como *fluff* — composto por plásticos, borracha, madeira e frações minerais — que atualmente é descartado em aterros, apesar de seu elevado potencial energético. Este estudo avaliou a viabilidade técnica e ambiental da gaseificação do *fluff* como alternativa ao uso de gás natural no reaquecimento de tarugos de aço bruto para conformação em laminador no processo siderúrgico. A abordagem baseou-se em três etapas principais: teste piloto de gaseificação, avaliação do ciclo de vida (ACV) e inventário de GEEs. Nos testes em escala semi-industrial, realizados com 1.132,5 kg de CDRI (Combustível Derivado de Resíduos Industriais), obteve-se uma geração específica de 1,02 Nm³/kg de gás de síntese. A composição média do gás foi de 71,5% de CH₄, 14,8% de CO₂ e 3,65% de CO, o que conferiu poder calorífico suficiente para sua utilização em motogeradores e aplicações térmicas. As emissões de HCl e Cl₂ ficaram abaixo dos limites estabelecidos pela CETESB após a lavagem dos gases. Realizou-se três cenários de ACV: (1) produção e uso de gás de síntese a partir do *fluff*, (2) uso exclusivo de gás natural e (3) disposição do *fluff* em aterro. Os dados foram modelados no SimaPro 9.6 com o método ReCiPe 2016 e base *Ecoinvent* 3.10. O gás de síntese apresentou desempenho ambiental superior ao gás natural em todas as categorias de impacto exceto na categoria de consumo de água, sobretudo quando a eletricidade utilizada provém de fonte renovável. O inventário de GEEs foi elaborado a partir da projeção de um ano de consumo de gás de síntese na unidade siderúrgica analisada, em substituição ao gás natural atualmente utilizado. Os resultados indicaram uma redução potencial de 5.220,45 tCO₂/ano, além da eliminação das emissões associadas à disposição do *fluff* em aterro. Os resultados reforçam o potencial da gaseificação como estratégia de valorização energética e redução de emissões na indústria do aço. Além disso, a alternativa avaliada demonstrou, por meio da ACV, benefícios ambientais ao transformar um resíduo em uma fonte energética útil, integrando ações de descarbonização e economia circular.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Economia Circular. Transição Energética. Fluff. Gaseificação. Siderurgia Sustentável.

ABSTRACT

The steel industry, responsible for about 7 to 9% of global greenhouse gas (GHG) emissions, faces the challenge of implementing decarbonization strategies in its processes. In this context, the use of scrap metal as a raw material helps reduce the demand for iron ore and the associated emissions. This scrap may originate from the automotive sector and other industrial segments, and its processing for use in steel plants generates a residue known as *fluff* — composed of plastics, rubber, wood, and mineral fractions — which is currently disposed of in landfills despite its high energy potential. This study evaluated the technical and environmental feasibility of *fluff* gasification as an alternative to natural gas in the reheating of steel billets for rolling in the steelmaking process. The approach was based on three main stages: pilot-scale gasification testing, Life Cycle Assessment (LCA), and GHG inventory. In semi-industrial scale tests conducted with 1,132.5 kg of Industrial Residue-Derived Fuel (IRDF), a specific generation of 1.02 Nm³/kg of synthesis gas was obtained. The average gas composition consisted of 71.5% CH₄, 14.8% CO₂, and 3.65% CO, providing a calorific value sufficient for use in power generators and thermal applications. Emissions of HCl and Cl₂ remained below CETESB regulatory limits after gas scrubbing. Three LCA scenarios were developed: (1) production and use of syngas from *fluff*, (2) exclusive use of natural gas, and (3) landfill disposal of *fluff*. Data modeling was performed in SimaPro 9.6 using the ReCiPe 2016 method and *Ecoinvent* 3.10 database. Syngas showed superior environmental performance compared to natural gas across all impact categories except water consumption, particularly when electricity used in oxygen production is from renewable sources. The GHG inventory was developed based on a one-year projection of syngas consumption in the analyzed steelmaking unit, replacing the natural gas currently used. The results indicated a potential reduction of 5,220.45 tCO₂/year, in addition to avoiding emissions associated with landfill disposal of *fluff*. These results highlight the potential of gasification as a strategy for energy recovery and emission reduction in the steel industry. Furthermore, the evaluated alternative demonstrated, through LCA, environmental benefits by transforming waste into a useful energy source, thus integrating decarbonization and circular economy actions.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA). Circular Economy. Energy Transition. *Fluff*. Gasification. Sustainable Steelmaking.

Lista de Figuras

Figura 1 –	Datas do Dia de Sobrecarga da Terra ao longo dos anos	15
Figura 2 –	Diagrama dos Limites Planetários: Estado Atual dos Processos	16
Figura 3 –	Rotas Integradas e Semi-Integradas de Produção do Aço	21
Figura 4 –	Processo de beneficiamento de sucata com impurezas	23
Figura 5 –	Imagem ampliada de resíduos da <i>Shredder</i>	24
Figura 6 –	Composição gravimétrica do <i>Fluff</i>	25
Figura 7 –	Produtos finais do gás de síntese	27
Figura 8 –	Diagrama esquemático do gaseificador de leito fixo e várias zonas de reação dentro do gaseificador	28
Figura 9 –	Proposta da Economia Circular	33
Figura 10 –	Soluções circulares têm o poder de reverter a ultrapassagem dos limites planetários	34
Figura 11 –	Fases de uma ACV	42
Figura 12 –	Abordagem iterativa na ACV	43
Figura 13 –	Fluxograma representativo dos limites do sistema e dos processos em uma ACV	46
Figura 14 –	Exemplo de fluxograma de processo explicitando as fronteiras a combinação dos processos elementares utilizando dados primários e secundários	48
Figura 15 –	Passos esquemáticos da AICV	51
Figura 16 –	Conceito de indicadores de categoria	54
Figura 17 –	Emissões de GEE divididas por escopo e categorias de emissão conforme GHG Protocol	59
Figura 18 –	Gaseificador semi-industrial utilizado para realização dos testes	62
Figura 19 –	Etapa do Teste piloto da gaseificação do <i>fluff</i>	63
Figura 20 –	Etapa da Avaliação do Ciclo de Vida	64
Figura 21 –	Etapa do Inventário de Gases de Efeito Estufa	65
Figura 22 –	Fronteiras do sistema – Cenário 1: Produção e uso de gás de síntese	72
Figura 23 –	Fronteiras do sistema – Cenário 2: Produção e uso de gás natural	73
Figura 24 –	Fronteiras do sistema – Cenário 3: Disposição do <i>fluff</i> em aterro sanitário	74
Figura 25 –	Combustível Derivado de Resíduo - CDRI	84
Figura 26 –	Chama do <i>flare</i> com gás de síntese	91

Figura 27 – Motogerador movido a Gás Natural	92
Figura 28 – Perfil de impacto por etapa – Cenário 1: Produção e uso de gás de síntese . . .	97
Figura 29 – Perfil de impacto por etapa – Cenário 2: Produção e uso de gás natural . . .	101
Figura 30 – Comparação entre os cenários – Gás de síntese vs. Gás natural	104
Figura 31 – Resultados normalizados de impacto ambiental dos cenários de gás natural e gás de síntese com diferentes origens de energia elétrica	108

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Intensidade de emissões de CO ₂ por rota de produção	22
Tabela 2 – Métodos analíticos aplicados às amostras de CDRI e subprodutos da gaseificação	68
Tabela 3 – Composição do <i>fluff</i> e distribuição do carbono por origem	76
Tabela 4 – Resumo dos fluxos modelados para o cenário de gás de síntese	77
Tabela 5 – Resumo de entradas e resíduos	86
Tabela 6 – Resultados da análise elementar do CDRI	87
Tabela 7 – Resultados da caracterização dos subprodutos da gaseificação.	88
Tabela 8 – Composição do gás de síntese.	91
Tabela 9 – Resultados dos COVs no gás de síntese.	93
Tabela 10 – Comparação entre a entrada e a saída do lavador de gases – Ácido Clorídrico e Cloro Livre (HCl + Cl ₂).	94
Tabela 11 – Resultados de caracterização por categoria de impacto para os dois cenários (por MJ de energia útil).	105
Tabela 12 – Impactos ambientais evitados ao recuperar energeticamente o <i>fluff</i> (1 kg) em vez de enviá-lo ao aterro.	106
Tabela 13 – Avaliação qualitativa da qualidade dos dados segundo a matriz de pedigree .	110
Tabela 14 – Resumo das emissões totais de GEE para os dois cenários avaliados.	113

Lista de Quadros

Quadro 1 – Estudos experimentais sobre a gaseificação do fluff.	30
Quadro 2 – Normas Relacionadas à ACV, Gestão de GEE e Gestão Ambiental.	38
Quadro 3 – Exemplo de Categorias de impacto avaliadas pelos métodos de AICV de abregência global.	52
Quadro 4 – Categorias de impacto ambiental consideradas no método ReCiPe 2016 Midpoint (H)	79
Quadro 5 – Descrição da matriz de pedigree para avaliação qualitativa de dados de ACV	81

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AG	Aquecimento Global
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ASR	<i>Automotive Shredder Residue</i> (Resíduo de Fragmentação Automotiva)
AT	Acidificação Terrestre
BF-BOF	<i>Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace</i> (Alto-forno e Convertedor a Oxigênio)
CA	Consumo de Água
CDRI	Combustível Derivado de Resíduos Industriais
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
Cl ₂	Cloro
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ eq	Dióxido de Carbono Equivalente
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
DAP	Declaração Ambiental de Produto
DO	Depleção da Camada de Ozônio Estratosférico
DRI-EAF	<i>Direct Reduced Iron – Electric Arc Furnace</i> (Redução Direta e Forno Elétrico a Arco)
EA	Eutrofização de Água Doce
EAF	<i>Electric Arc Furnace</i> (Forno Elétrico a Arco)
ED	Ecotoxicidade em Água Doce
EF	Escassez de Recursos Fósseis
ELV	<i>End-of-Life Vehicles</i> (Veículos no Fim da Vida Útil)
EM	Ecotoxicidade Marinha
EMa	Eutrofização Marinha
ER	Escassez de Recursos Minerais
ET	Ecotoxicidade Terrestre
FGV	Fundação Getúlio Vargas
FO	Formação de Ozônio em Ecossistemas Terrestres
FP	Formação de Material Particulado Fino

FS	Formação de Ozônio na Saúde Humana
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	<i>Greenhouse Gas</i> (Gases de Efeito Estufa)
GLAD	<i>Global Life Cycle Assessment Data Access Network</i> (Rede Global de Acesso a Dados de ACV)
GLAM	<i>Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators and Methods</i> (Orientações Globais para Indicadores e Métodos de AICV)
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
HCl	Ácido Clorídrico
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i> (Avaliação do Ciclo de Vida)
LU	<i>Land Use</i> (Uso da Terra)
MO	Formação de Material Particulado
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₃	Ozônio
OC	Compostos Orgânicos Clorados
PAH	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCR	<i>Product Category Rules</i> (Regras de Categoria de Produto)
PEF	<i>Product Environmental Footprint</i> (Pegada Ambiental de Produto)
PFCs	Perfluorcarbonos
PM	Material Particulado
PT	Toxicidade Não Carcinogênica para Humanos
RI	Radiação Ionizante
SO ₂	Dióxido de Enxofre
TC	Toxicidade Carcinogênica para Humanos
TN	Toxicidade Não Carcinogênica para Humanos

Sumário

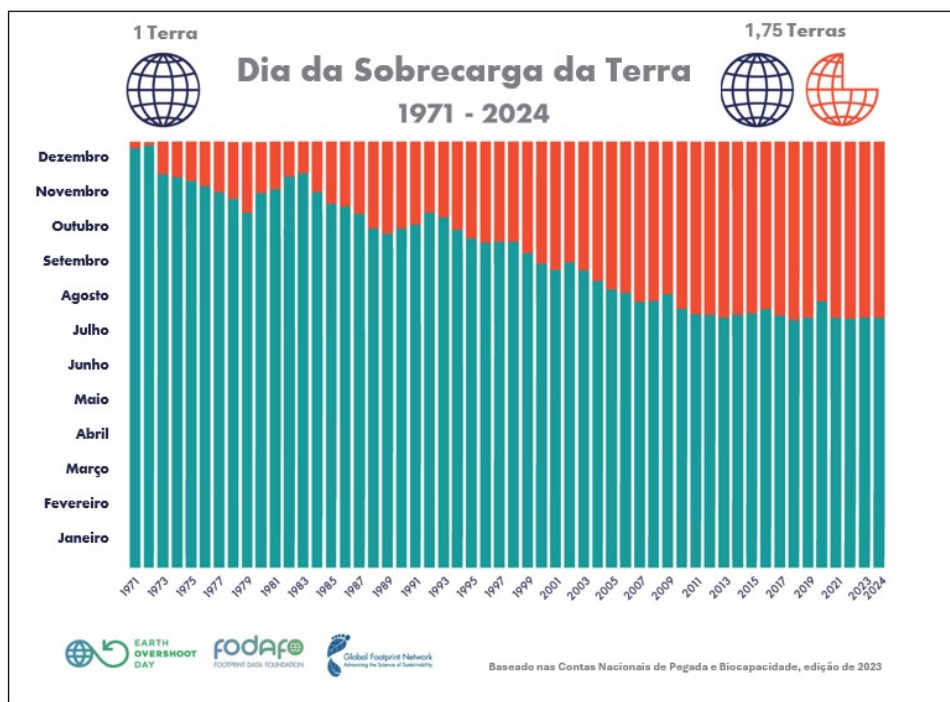
1 – INTRODUÇÃO	15
2 – OBJETIVO GERAL	19
2.1 Objetivos Específicos	19
3 – REVISÃO DA LITERATURA	20
3.1 Indústria do Aço	20
3.2 Resíduos da sucata	23
3.3 Processo de gaseificação	26
3.4 Economia circular	31
3.5 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	36
3.5.1 Etapas de elaboração de um estudo de ACV	41
3.5.1.1 Objetivo e Escopo da ACV	44
3.5.1.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	46
3.5.1.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)	50
3.5.1.4 Interpretação	55
3.6 Inventário de Gases de Efeito Estufa	56
4 – MATERIAIS E MÉTODOS	61
4.1 Teste piloto da caracterização da gaseificação do <i>fluff</i>	65
4.1.1 Caracterização do gás de síntese	66
4.1.2 Caracterização do CDRI e dos subprodutos da gaseificação	67
4.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	68
4.2.1 Objetivo e escopo do estudo	68
4.2.1.1 Função, unidade funcional e fluxo de referência	69
4.2.1.2 Fronteiras do sistema	70
4.2.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	75
4.2.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	78
4.2.4 Interpretação dos resultados	79
4.2.5 Avaliação da qualidade dos dados	80
4.3 Inventário de Gases de Efeito Estufa dos Cenários Avaliados	81

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
5.1 Teste Piloto da gaseificação do <i>fluff</i>	84
5.1.1 Caracterização do CDRI - Combustível Derivado de Resíduo Industrial (<i>Fluff</i>)	86
5.1.2 Caracterização dos subprodutos da gaseificação	87
5.1.3 Caracterização do gás de síntese	90
5.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	94
5.2.1 Cenário 1: Produção e uso de gás de síntese	96
5.2.2 Cenário 2: Produção e uso de gás natural	99
5.2.3 Comparação entre os cenários 1 e 2	102
5.2.4 Cenário 3: Disposição do <i>fluff</i> em aterro sanitário	105
5.2.5 Análise de Sensibilidade	106
5.2.6 Avaliação da qualidade dos dados e limitações do estudo	109
5.2.7 Inventário de Gases de Efeito Estufa	112
6 – CONCLUSÃO	115
Referências	117

1 INTRODUÇÃO

Os desafios impostos pelas mudanças do clima e pelo esgotamento de recursos naturais evidenciam os limites do modelo econômico linear, baseado no consumo crescente e na lógica de produção-descarte. A *Global Footprint Network* estima anualmente o “Dia da Sobrecarga da Terra” (*Earth Overshoot Day*), que marca o momento do ano em que a demanda da humanidade por recursos naturais ultrapassa a capacidade do planeta de regenerá-los. Em 2024, essa data foi estimada para 1º de agosto, indicando que seriam necessários mais de 1,7 planetas Terra para sustentar o atual padrão de consumo global (NETWORK, 2024). A evolução deste indicador ao longo das décadas esta ilustrada na Figura 1.

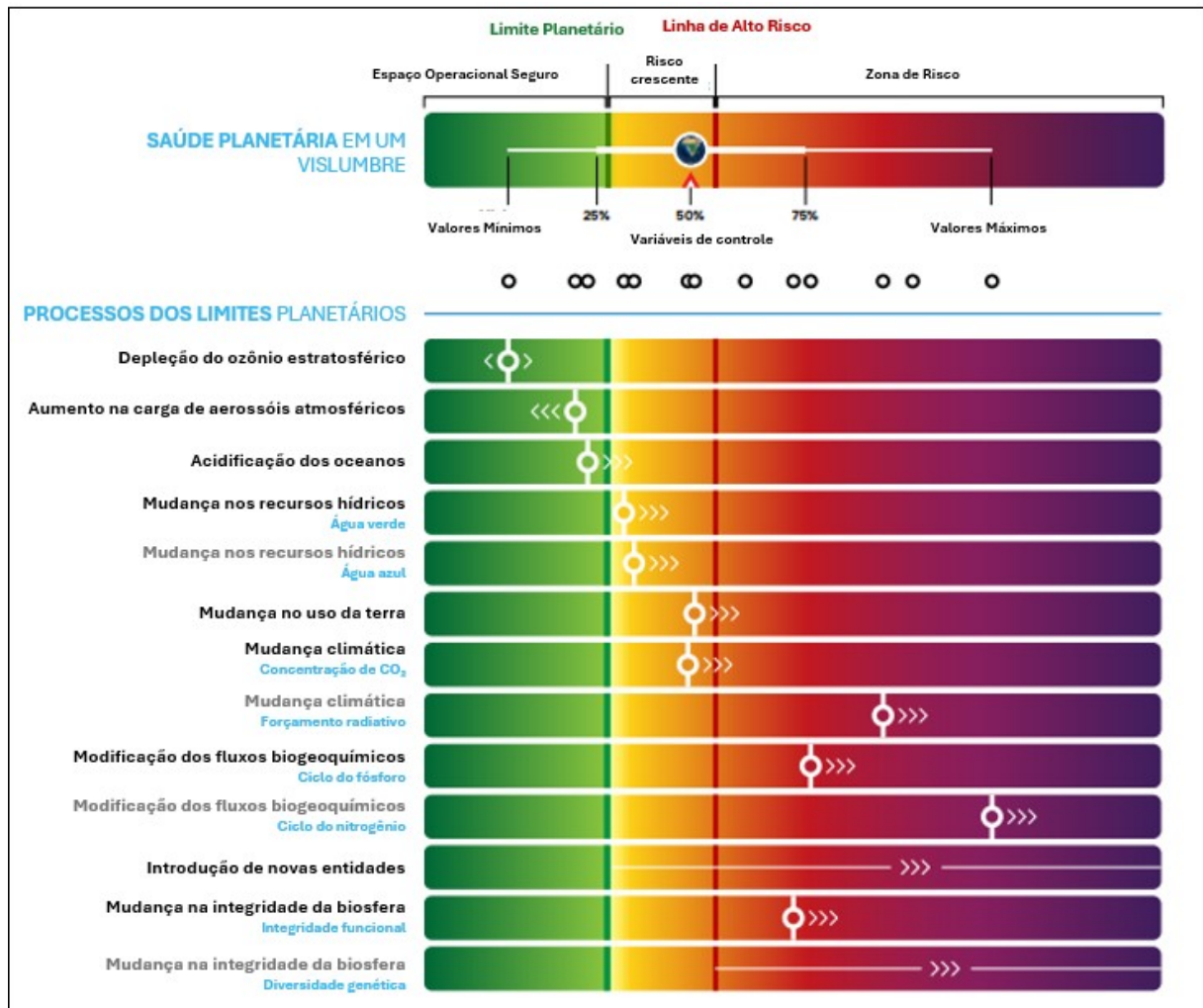
Figura 1 – Datas do Dia de Sobrecarga da Terra ao longo dos anos



Fonte: Adaptado de NETWORK (2024).

Esse cenário de insustentabilidade está diretamente relacionado à ultrapassagem dos chamados limites planetários — um conjunto de nove processos ambientais fundamentais para a estabilidade do sistema terrestre, como o clima, a biodiversidade e o uso da terra. De acordo com o relatório *Planetary Health Check 2024*, seis desses limites já foram transgredidos, refletindo a crescente pressão antrópica sobre os ecossistemas globais (CAESAR et al., 2024), como representado na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama dos Limites Planetários: Estado Atual dos Processos



Fonte: Adaptado de Caesar et al. (2024).

Nesse contexto, a transição para modelos econômicos circulares tem ganhado destaque como alternativa viável para promover o uso mais eficiente dos recursos, reduzir a geração de resíduos e mitigar os impactos ambientais. A economia circular pode ser definida como um sistema econômico regenerativo, que propõe a substituição do conceito de “fim de vida” pela redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais em toda a cadeia de suprimentos, com vistas à qualidade ambiental, ao desenvolvimento econômico e à equidade social (OMETTO; SARKIS; EVANS, 2024).

O movimento mundial para enfrentamento das mudanças climáticas tem impulsionado uma série de iniciativas públicas e privadas voltadas à redução das emissões de gases de efeito estufa (GEEs), com destaque para setores industriais de alta intensidade energética. A indústria do aço, nesse contexto, representa uma das maiores fontes de emissão, sendo responsável por

aproximadamente 7% a 9% das emissões globais de GEEs (RESPONSIBLE STEEL, 2022).

Ao mesmo tempo, observa-se uma crescente demanda global por aço, impulsionada pelo desenvolvimento urbano e industrial. Esse cenário impõe desafios significativos à transição para processos mais sustentáveis, ao mesmo tempo em que abre oportunidades para inovação tecnológica e reaproveitamento de resíduos. A produção de aço a partir da reciclagem de sucata metálica tem se consolidado como uma alternativa estratégica para a redução de emissões, uma vez que apresenta menor pegada de carbono quando comparada à rota integrada tradicional, baseada na redução do minério de ferro com uso de carvão mineral em altos-fornos (ARCELORMITTAL BRASIL, 2021b).

O uso da sucata reciclada exige etapas adicionais de beneficiamento, uma vez que os materiais metálicos estão frequentemente associados a outros materiais oriundos de seu uso anterior — como em veículos, eletrodomésticos e móveis. Para permitir sua reutilização na fabricação do aço, é necessária a separação entre as frações metálica e não metálica, processo comumente realizado por equipamentos como o *shredder*, que fragmentam e classificam os materiais, resultando na geração de resíduos compostos por um mix de materiais não utilizados na fabricação do aço (BATISTA, 2014).

Dentre os resíduos gerados nesse processo, destaca-se o *fluff*, fração leve composta principalmente por materiais de baixa densidade como plásticos, espumas, tecidos e madeira. Esse resíduo é majoritariamente destinado a aterros, o que representa não apenas um desafio ambiental, mas também uma subutilização de seu potencial energético pois o *fluff* possui poder calorífico médio de 4.527,48 kcal/kg, sendo comparável ao do carvão mineral brasileiro, o que o torna um candidato viável à recuperação energética (BATISTA, 2014).

Segundo Stanicic et al. (2021), em situações nas quais não é viável o reuso ou a reciclagem dos resíduos, a recuperação energética é uma alternativa recomendada, podendo ser realizada por meio da gaseificação. Esse processo térmico converte resíduos sólidos em gás de síntese, que pode ser utilizado como combustível em aplicações industriais. Na siderurgia, por exemplo, o gás de síntese pode ser empregado em fornos de reaquecimento de tarugos ou placas, em substituição parcial ou total ao gás natural.

O gás natural, por sua vez, é amplamente utilizado como fonte de energia térmica em diversos setores industriais e responde por cerca de 20% das emissões diretas de CO₂ do setor industrial global (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). A substituição desse insumo por alternativas obtidas a partir de resíduos pode representar ganhos ambientais e contribuir para a estratégia de valorização de resíduos e transição energética. No entanto, os efeitos ambientais

dessa substituição devem ser avaliados de forma criteriosa e sistêmica (VERMAAS; GIESEN; RAMIREZ, 2020).

Para apoiar esse tipo de análise, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem se consolidado como uma ferramenta essencial no suporte à tomada de decisão, ao permitir a quantificação dos impactos ambientais potenciais ao longo de todas as etapas do ciclo de vida de um produto ou processo. Dentre as categorias de impacto comumente avaliadas, destaca-se o “aquecimento global”, associado à emissão de GEEs (ABNT NBR ISO 14040, 2025). A ACV também pode ser aplicada na avaliação de cenários futuros, permitindo a comparação de diferentes alternativas de produtos e processos. Por exemplo, ao considerar a introdução de um novo produto ou a substituição de um material por outro, a ACV pode prever os impactos ambientais potenciais de cada opção. Essa abordagem é especialmente útil em contextos de inovação, nos quais empresas buscam desenvolver soluções mais sustentáveis. A análise pode contemplar diferentes matérias-primas, processos de produção e métodos de descarte, auxiliando na identificação das alternativas com melhor desempenho ambiental (JOLLIET et al., 2016).

Diante desse contexto, o presente estudo aplica a metodologia de ACV para avaliar os impactos ambientais do uso do gás de síntese, gerado a partir da gaseificação do resíduo *fluff*, em substituição ao gás natural em fornos de reaquecimento de tarugos na indústria siderúrgica. A pesquisa também busca investigar se essa substituição pode resultar em uma redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para estratégias de economia circular e para o atendimento às metas globais de descarbonização e sustentabilidade ambiental.

2 OBJETIVO GERAL

Avaliar os benefícios do uso na siderurgia do gás de síntese gerado a partir da gaseificação do resíduo *fluff* em comparação com o uso do gás natural sob a perspectiva da economia circular e da descarbonização, utilizando avaliação do ciclo de vida (ACV) e inventário de gases de efeito estufa (GEE).

2.1 Objetivos Específicos

1. Acompanhar teste piloto da gaseificação do *fluff*, com a caracterização dos gases produzidos e dos resíduos gerados no processo;
2. Realizar ACV da produção e consumo do gás de síntese com os resultados dos testes realizados;
3. Realizar ACV da produção e consumo do gás natural;
4. Realizar ACV do envio do *fluff* para disposição final;
5. Avaliar os resultados das ACV's e comparar os impactos ambientais do uso do gás de síntese com os do gás natural, considerando sua aplicação em fornos de reaquecimento de tarugo;
6. Elaborar o inventário de emissões de GEEs em uma usina siderúrgica para os dois cenários avaliados: (i) uso do gás de síntese oriundo da gaseificação do *fluff* e (ii) uso do gás natural com disposição do *fluff* em aterro.

3 REVISÃO DA LITERATURA

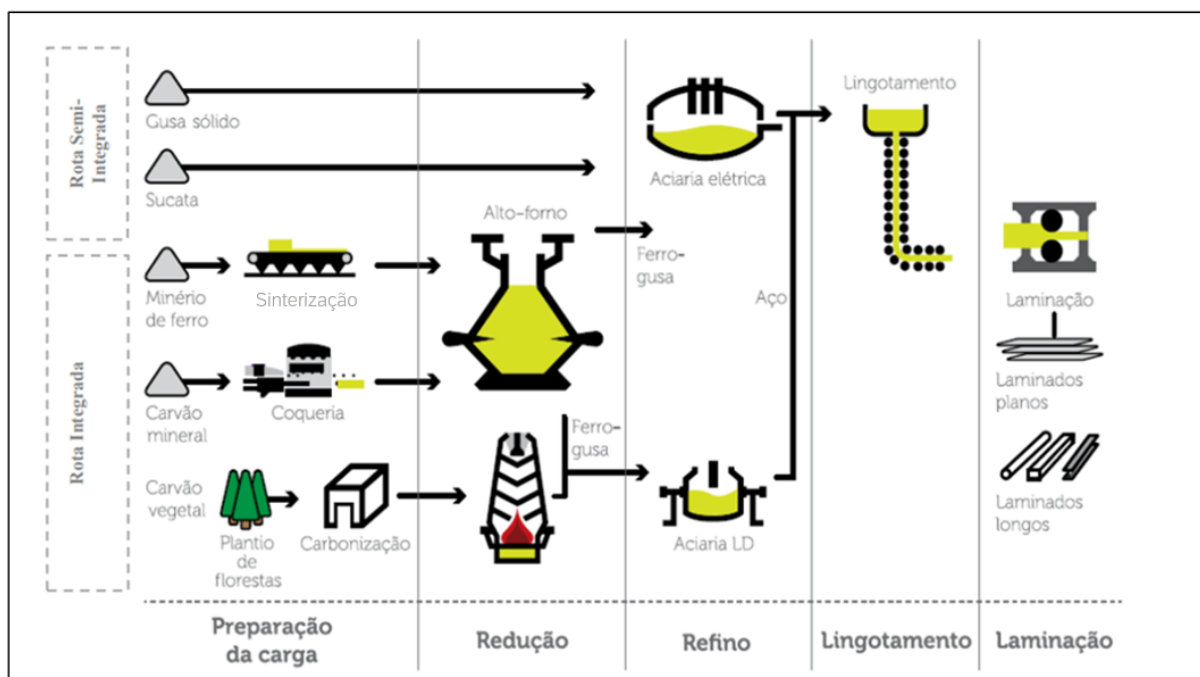
3.1 Indústria do Aço

O aço é uma liga metálica composta principalmente de ferro (Fe) e carbono (C), que oferece propriedades superiores às do ferro puro, como maleabilidade, durabilidade, elasticidade, boa condutividade térmica e alta resistência. Existem milhares de tipos de aço, classificados em três categorias principais: aços carbono, aços de baixa liga e aços de alta liga. Devido às suas características, o aço é amplamente aplicável em diversos setores industriais, incluindo construção civil, indústria automotiva, infraestrutura e manufatura. Suas aplicações variam desde chapas para carrocerias de veículos e estruturas metálicas na construção civil até trilhos ferroviários, arames e itens domésticos. Além disso, o aço é essencial na fabricação de meios de transporte e no setor energético, evidenciando sua relevância como material estratégico para o desenvolvimento tecnológico e econômico (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2025a).

Considerado uma das maiores *commodities* globais, o aço desempenha um papel crucial nas economias mundiais. Em 2023, a produção mundial de aço bruto alcançou aproximadamente 1,892 bilhões de toneladas, consolidando a China como a principal produtora responsável por 53,9% do total mundial. O Brasil, ocupando a 9ª posição global, produziu cerca de 32 milhões de toneladas de aço bruto, representando aproximadamente 1,7% do total mundial. A produção brasileira destaca-se também na América Latina, onde o país lidera como maior produtor regional, contribuindo significativamente para o desenvolvimento econômico e industrial da região (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2024).

A produção do aço pode ser dividida em dois grupos principais: usina integrada e usina semi-integrada, conforme apresentado na Figura 3. Nas usinas integradas, todos os processos, desde a redução do minério de ferro até a produção do aço, ocorrem em uma única unidade industrial. Já nas usinas semi-integradas, o aço é produzido a partir de sucata de aço, eliminando a necessidade da redução do minério de ferro. Os processos da siderurgia incluem redução, refino e laminação. A redução, presente apenas nas usinas integradas, envolve a produção de ferro gusa em altos-fornos utilizando carvão vegetal, coque metalúrgico ou carvão mineral (BA-SHAMMAKH, 2019).

Figura 3 – Rotas Integradas e Semi-Integradas de Produção do Aço



Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL (2025a)

Dentre os principais aspectos ambientais na produção de aço, destacam-se as emissões de dióxido de carbono (CO_2), que tornam a indústria siderúrgica uma das maiores contribuidoras para os gases de efeito estufa globais – segundo RESPONSIBLE STEEL (2022) responde por cerca de 7% a 9% das emissões mundiais. Além disso, o consumo significativo de recursos naturais, como minério de ferro, carvão e grandes volumes de água, também figura como um fator crítico. A geração de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas representa outro desafio ambiental, exigindo estratégias eficazes de gestão para minimizar os impactos negativos (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2023).

O alto-forno a coque metalúrgico presente na etapa de Redução é responsável por 69% das emissões de CO_2 da siderurgia integrada, e, devido à ausência deste processo, as usinas semi-integradas apresentam menor intensidade de carbono. (BA-SHAMMAKH, 2019). O refino transforma ferro-gusa, ferro-esponja ou sucata metálica em aço nas aciarias. A laminação é o processo de transformação mecânica do aço bruto, que pode ser conformado em produtos planos (chapas e bobinas) ou longos (vergalhões, barras e perfis) (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2025b).

De acordo com a WORLD STEEL ASSOCIATION (2023), a intensidade média global de emissões de CO_2 na produção de aço é de aproximadamente 1,92 toneladas de CO_2 por tonelada de aço bruto produzido. Especificamente, o processo BF-BOF (rota integrada) emite cerca de 2,32

toneladas de CO₂ por tonelada de aço, enquanto o processo EAF (rota semi-integrada) baseado em sucata emite aproximadamente 0,70 toneladas de CO₂ por tonelada de aço, conforme apresentado na Tabela 1. Essa diferença substancial deve-se ao fato de que as usinas semi-integradas utilizam sucata metálica, reduzindo a necessidade de extração e processamento de matérias-primas virgens, além de consumirem menos energia e gerarem menores volumes de resíduos e emissões.

Tabela 1 – Intensidade de emissões de CO₂ por rota de produção

Intensidade de emissões por rota de produção (Tonelada de CO ₂ / Tonelada de aço bruto)			
	2021	2022	2023
Média global	1.91	1.92	1.92
BF-BOF	2.33	2.33	2.32
Sucata-EAF	0.66	0.67	0.70
DRI-EAF	1.40	1.36	1.43

*Rota DRI-EAF faz parte de semi-integrada mas com características próprias. Substitui o alto-forno (BF) por uma etapa de redução direta para produzir ferro metálico com minério de ferro (DRI) sem fusão, utilizando gás natural ou hidrogênio como agentes redutores.

Fonte: Adaptado de *World Steel Association* (2024).

Nesse contexto, a produção de aço a partir da reciclagem de sucata metálica emerge como uma estratégia crucial para a descarbonização do setor siderúrgico. A Siderúrgica ArcelorMittal, em seu *Climate Action Report 2* de 2021, destaca a reciclagem de sucata como uma componente essencial em sua estratégia de redução de emissões de CO₂, visando alcançar a neutralidade de carbono até 2050.

No entanto, ainda existem questões ambientais relevantes a serem abordadas para a rota semi-integrada que devem buscar soluções inovadoras. Um dos principais desafios está relacionado ao uso de gás natural na etapa de laminação, que pode ser substituído por combustíveis alternativos, como o gás de síntese, produzido a partir de resíduos ou biomassas, para reduzir ainda mais as emissões de gases de efeito estufa (SCHMITZ et al., 2021).

Além disso, há a questão da eliminação de resíduos oriundos da sucata metálica, como plásticos, borrachas e outros materiais contaminantes, que são destinados a aterros. A implementação de tecnologias de reaproveitamento desses resíduos pode contribuir para mitigar os impactos ambientais e avançar na direção de uma economia mais circular (ARCELORMITTAL BRASIL, 2021a).

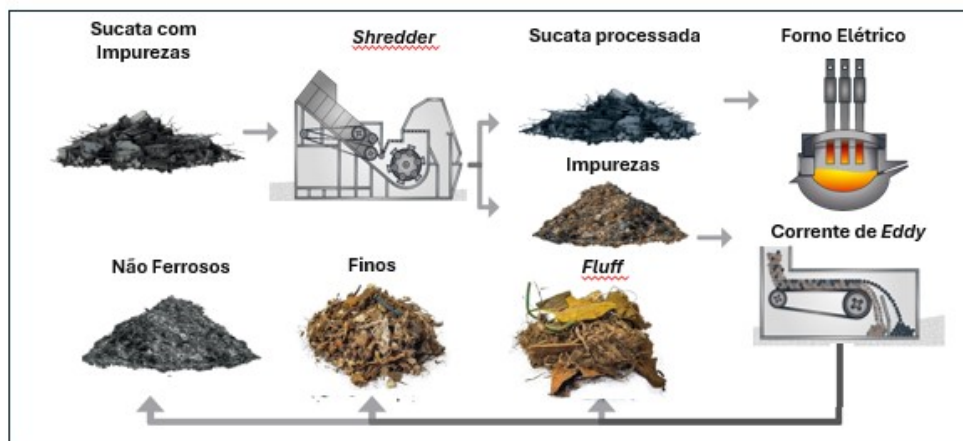
3.2 Resíduos da sucata

O Instituto Aço Brasil, que reúne e representa as empresas brasileiras produtoras de aço, divulgou em seu Anuário Estatístico de 2024 que o consumo de sucata no país atingiu 7,8 milhões de toneladas em 2023. De acordo com um estudo realizado por BATISTA (2014), aproximadamente 23% da sucata utilizada em uma siderúrgica brasileira de rota semi-integrada, é composta por resíduos não metálicos.

A classificação do tamanho da sucata e a redução de impurezas são cruciais para a produtividade dos fornos de aciarias elétricas em siderúrgicas semi-integradas (BATISTA, 2014). Os trituradores de sucata, ou *Shredders*, recuperam metais ferrosos e não-ferrosos de veículos de fim de vida (ELV, sigla em inglês para *end of life vehicles*) e de outros produtos descartados que contenham metais, eliminando impurezas e ajustando o tamanho da sucata. Os resíduos remanescentes após a recuperação dos metais são os resíduos do triturador, que serão utilizados na siderurgia.

A Figura 4, retirada do Catálogo de Coprodutos da ArcelorMittal Juiz de Fora, disponível no site da empresa, ilustra o beneficiamento de sucata com impurezas por meio da *Shredder*, mostrando a geração de impurezas. A Figura 5, da mesma fonte, exibe uma imagem ampliada desses resíduos, destacando a heterogeneidade do material.

Figura 4 – Processo de beneficiamento de sucata com impurezas



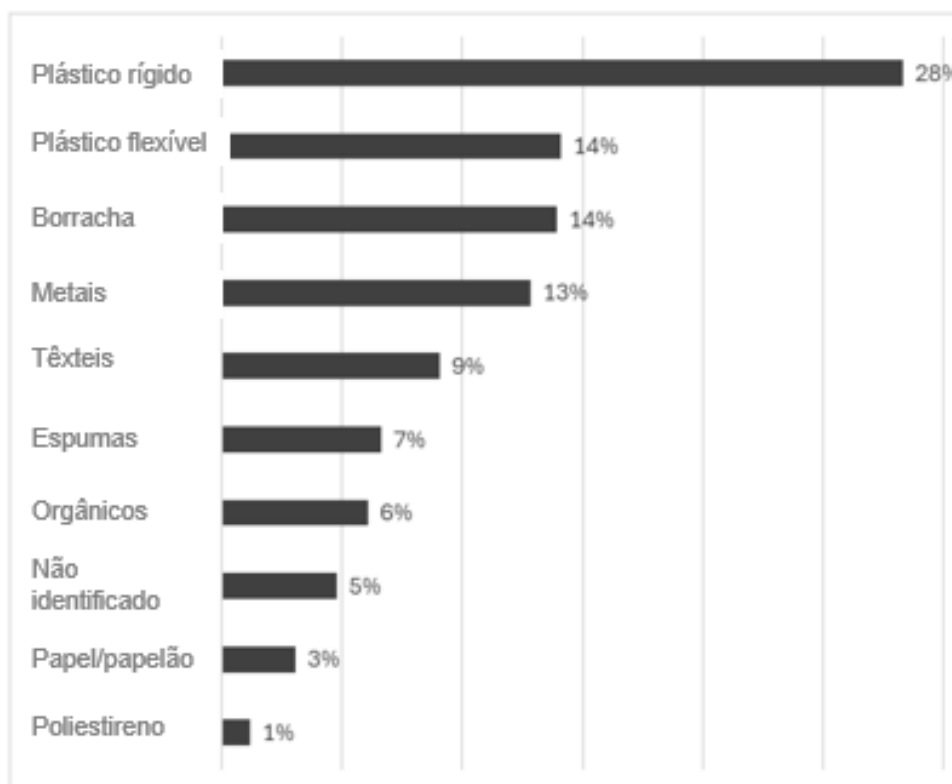
Fonte: ARCELORMITTAL BRASIL (2021a).

Figura 5 – Imagem ampliada de resíduos da *Shredder*



Fonte: ARCELORMITTAL BRASIL (2021a).

De acordo com MANCINI, TAMMA e VIOTTI (2010), os resíduos do triturador são classificados em *fluff*, finos e não-ferrosos. O *fluff* possui maior granulometria e menor densidade, enquanto os finos têm menor granulometria e maior densidade. Esses resíduos são compostos principalmente por frações orgânicas como borracha, esponja, plásticos, têxteis e, em alguns casos, madeira, e frações inorgânicas como areia e metais. Um estudo recente realizado por RIBEIRO et al. (2024) no Brasil estudou a composição do *fluff*, apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Composição gravimétrica do *Fluff*

Fonte: RIBEIRO et al. (2024)

O *Fluff*, também conhecido como *Automotive Shredder Residue* (ASR, sigla em inglês), representa de 15 a 25% da massa dos veículos no final de sua vida útil e é geralmente descartado em aterros, contribuindo para a contaminação do solo e do ar, além de representar um desperdício de materiais potencialmente valiosos. Além disso, a sua utilização em processos de incineração apresenta desafios significativos devido à presença de compostos organoclorados que podem levar à formação de poluentes como dioxinas e furanos, cuja formação é difícil de controlar em condições operacionais inadequadas. Tais questões destacam a necessidade de tecnologias alternativas que mitiguem os impactos ambientais e aproveitem melhor este material heterogêneo e complexo (MANENTE et al., 2022).

A Diretiva 2000/53/CE da União Europeia e outras orientações similares, desempenham um papel importante na motivação para o desenvolvimento de tecnologias de valorização do ASR. Estas normas estabelecem metas ambiciosas, como a reutilização e recuperação de, no mínimo, 95% dos veículos em termos de massa, incentivando a reciclagem e a recuperação energética. Nesse contexto, a gaseificação surge como uma alternativa promissora, uma vez que, além de atender às exigências regulatórias, promove os princípios da economia circular

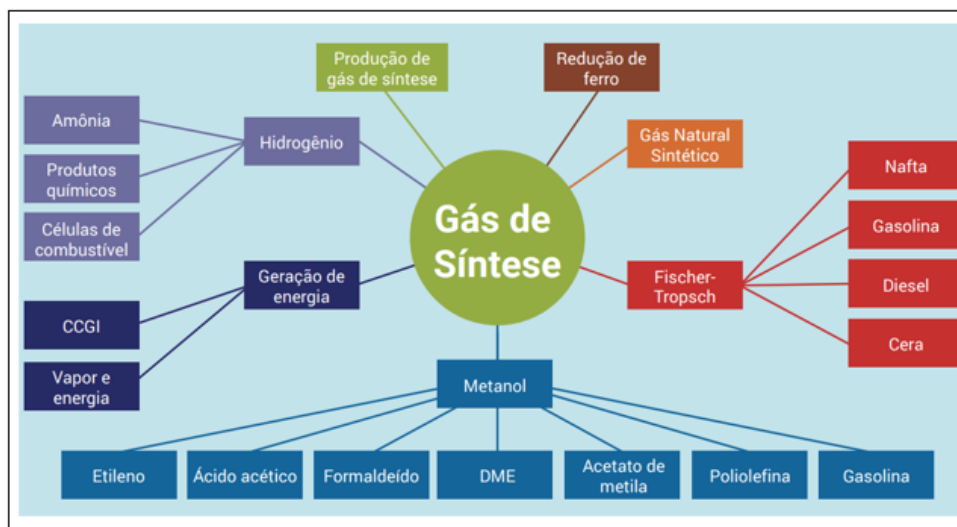
ao reduzir o descarte em aterros e aumentar o aproveitamento dos materiais contidos no ASR (MANENTE et al., 2022).

O estudo realizado por BATISTA (2014) identificou que os resíduos da *Shredder* são divididos igualmente entre finos e *fluff*, sugerindo o aproveitamento energético do *fluff* devido ao seu poder calorífico de 4.527,48 kcal/kg e a utilização dos finos na construção civil. Neste contexto, a gaseificação oferece uma rota eficaz para a conversão de componentes do *fluff* em produtos de maior valor agregado, como combustíveis sintéticos e produtos químicos (por exemplo, metanol e hidrogênio). Esse processo opera em altas temperaturas, acima de 700 °C, em condições de oxidação parcial, resultando em gás de síntese com potencial para substituir combustíveis fósseis e reduzir a pegada de carbono. Além disso, a gaseificação pode contribuir para a recuperação de metais presentes no resíduo sólido, minimizando os impactos ambientais associados ao descarte desses materiais e permitindo sua reutilização em outras aplicações industriais (MANENTE et al., 2022).

3.3 Processo de gaseificação

A gaseificação é um processo termoquímico avançado que transforma materiais carbonosos em gás de síntese, uma mistura energética composta principalmente por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), e, ocasionalmente, metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O). O gás de síntese tem aplicações amplas conforme a Figura 7, que vão além da geração de energia, da fabricação de ferro e aço, e da produção de gás natural sintético (GNS). Ele também é utilizado na obtenção de produtos químicos, petroquímicos e combustíveis de alto valor agregado, como fertilizantes/metanol, dimetil éter (DME), etileno, hidrogênio e amônia. Adicionalmente, serve para a produção de produtos *Fischer-Tropsch* (FT), incluindo combustível sintético para aviação (PROQR, 2021).

Figura 7 – Produtos finais do gás de síntese



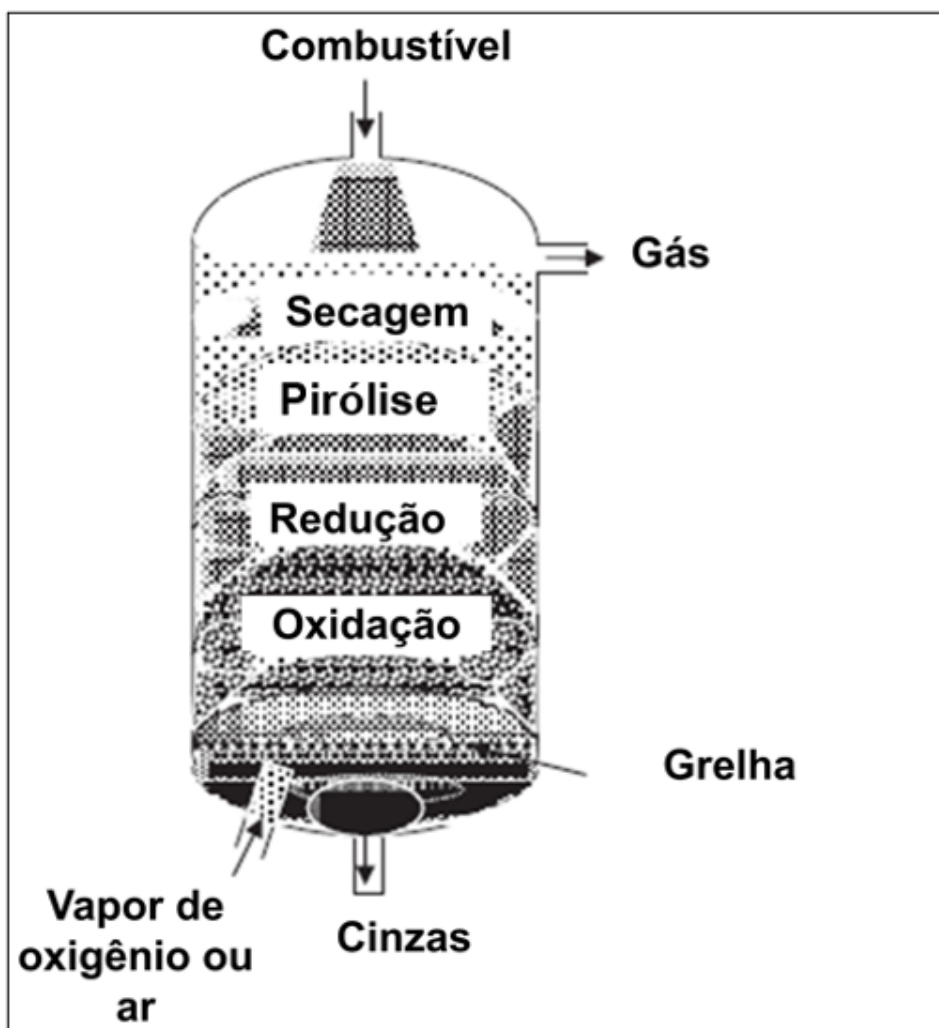
Fonte: Aberg (2014) *apud* PROQR (2021).

O processo de gaseificação envolve a reação do material carbonoso com um agente gaseificante — ar, oxigênio, vapor de água, ou suas combinações — em condições de alta temperatura, tipicamente entre 800°C e 1000°C. Destaca-se pela sua eficiência e capacidade de suporte à produção de energia limpa e sustentável (PROQR, 2021).

A principal diferença entre a combustão e a gaseificação está na quantidade de oxigênio utilizado. Na gaseificação, a quantidade é limitada, criando um ambiente redutor que impede a oxidação completa dos materiais, permitindo a formação de gás de síntese ao invés de CO₂ e vapor de água (MANENTE et al., 2022).

O processo de gaseificação compreende várias etapas-chave, ilustradas na Figura 8. Inicia-se com a secagem, na qual se remove a umidade do combustível. Em seguida, ocorre a pirólise, uma etapa na qual o aquecimento do combustível leva à liberação de voláteis, como gases e vapores. Após a pirólise, restam as substâncias que não se transformaram em gás durante esse processo, denominadas "substâncias não voláteis". Essas substâncias são a fração sólida do combustível, composta principalmente por carbono, cinzas e outros compostos orgânicos que não evaporam nas condições de aquecimento empregadas. Elas são importantes porque reagem com os agentes gaseificantes, como ar, oxigênio e vapor, na etapa de Redução que é a seguinte do processo de gaseificação, resultando na produção de gás de síntese. Por fim, na etapa de oxidação, parte do carbono é oxidada para fornecer a energia necessária para manter o processo de gaseificação (MONDAL; DANG; GARG, 2011).

Figura 8 – Diagrama esquemático do gaseificador de leito fixo e várias zonas de reação dentro do gaseificador



Fonte: Adaptado de MONDAL, DANG e GARG (2011).

Existem diferentes configurações tecnológicas para gaseificadores, incluindo leito fixo, leito fluidizado e gaseificação em leito duplo. O sistema de leito duplo, por exemplo, separa fisicamente as reações exotérmicas (combustão) das endotérmicas (gaseificação), utilizando um material de leito que circula entre os dois reatores, fornecendo calor e promovendo uma conversão eficiente dos resíduos (MARIC et al., 2018).

O processo de gaseificação é adequado para recuperação energética de resíduos plásticos mistos, característica encontrada em resíduos de *shredder*. Embora esse tipo de reciclagem seja menos comum do que a incineração para esse tipo de material, também oferece vantagem para redução de emissões como as dioxinas (Maric et al., 2018). De acordo com estudo realizado em 2015 pela Agência Dinamarquesa de Proteção do Ambiente, sobre Avaliação do Ciclo de Vida de resíduos da *shredder*, para processos que envolvem a recuperação energética do *fluff*,

recomenda-se a condução desses estudos associada a testes em escala piloto (BOLDRIN et al., 2015).

O estudo realizado por MANENTE et al. (2022) apresenta uma revisão científica de estudos que realizaram a gaseificação do resíduo de fragmentação automotiva (ASR ou *fluff*), apresentados de forma simplificada no Quadro 1.

Estes estudos destacam que este processo opera em altas temperaturas, permitindo a recuperação de energia e materiais contidos no ASR, com menor impacto ambiental em comparação à incineração. Além disso, a gaseificação alinha-se às metas de economia circular e às exigências de legislações ambientais, como a Diretiva 2000/53/CE da União Europeia (MANENTE et al., 2022).

Quadro 1 – Estudos experimentais sobre a gaseificação do fluff.

Autores	Tipo de Gaseificador	Agente de Gaseificação	Temp. (°C)	Principais Produtos	Escala	Objetivo dos Testes
Lin et al. (2010)	Leito fixo (<i>down-draft</i>)	Oxigênio e vapor	487-627	Hidrogênio puro (54% vol.)	Laboratorial	Gerar hidrogênio de alta pureza a partir do gás de síntese, com aplicação em células de combustível.
Cheng et al. (2020)	Leito fixo e fluidizado	Oxigênio e vapor	800-900	Hidrogênio e gás de síntese	Laboratorial	Avaliar o uso de catalisadores para melhorar o rendimento de hidrogênio e a qualidade do gás de síntese.
Cho et al. (2009)	Eixo vertical (<i>shaft type</i>)	Ar	600-1000	Gás de síntese e resíduo sólido reciclável	Laboratorial	Produzir gás de síntese e transformar o resíduo sólido em material reciclável.
Yoo et al. (2022)	Leito fixo	Ar	800-1200	Hidrogênio e resíduo sólido para tijolos	Laboratorial	Maximizar a produção de hidrogênio e criar um resíduo sólido adequado para fabricação de tijolos.
Taylor et al. (2013)	<i>Gasplasma</i> ® (leito fluidizado e plasma)	Oxigênio e vapor	700-1200	Gás de síntese e agregado vitrificado	Semi-industrial	Demonstrar a viabilidade de uma tecnologia avançada de gaseificação com plasma.
Maric et al. (2018)	Leito fluidizado indireto (<i>dual</i>)	Vapor	775-840	Hidrocarbonetos e metanol	Semi-industrial	Investigar a produção de hidrocarbonetos e metanol a partir do gás de síntese.

Fonte: Adaptado de Manente et al. (2022).

3.4 Economia circular

A Economia Circular ganhou força na comunidade empresarial global nos últimos anos, apoiado por múltiplos atores e principalmente defendido pela Fundação Ellen McArthur – considerada o epicentro do tema. Em seus poucos anos de existência, a Fundação Ellen McArthur conseguiu colocar a Economia Circular no discurso de CEOs de empresas globais, promover o lançamento do pacote de Economia Circular na Europa e lançar a Plataforma de Aceleração da Economia Circular no Fórum Econômico Mundial (REDE ACV, 2024).

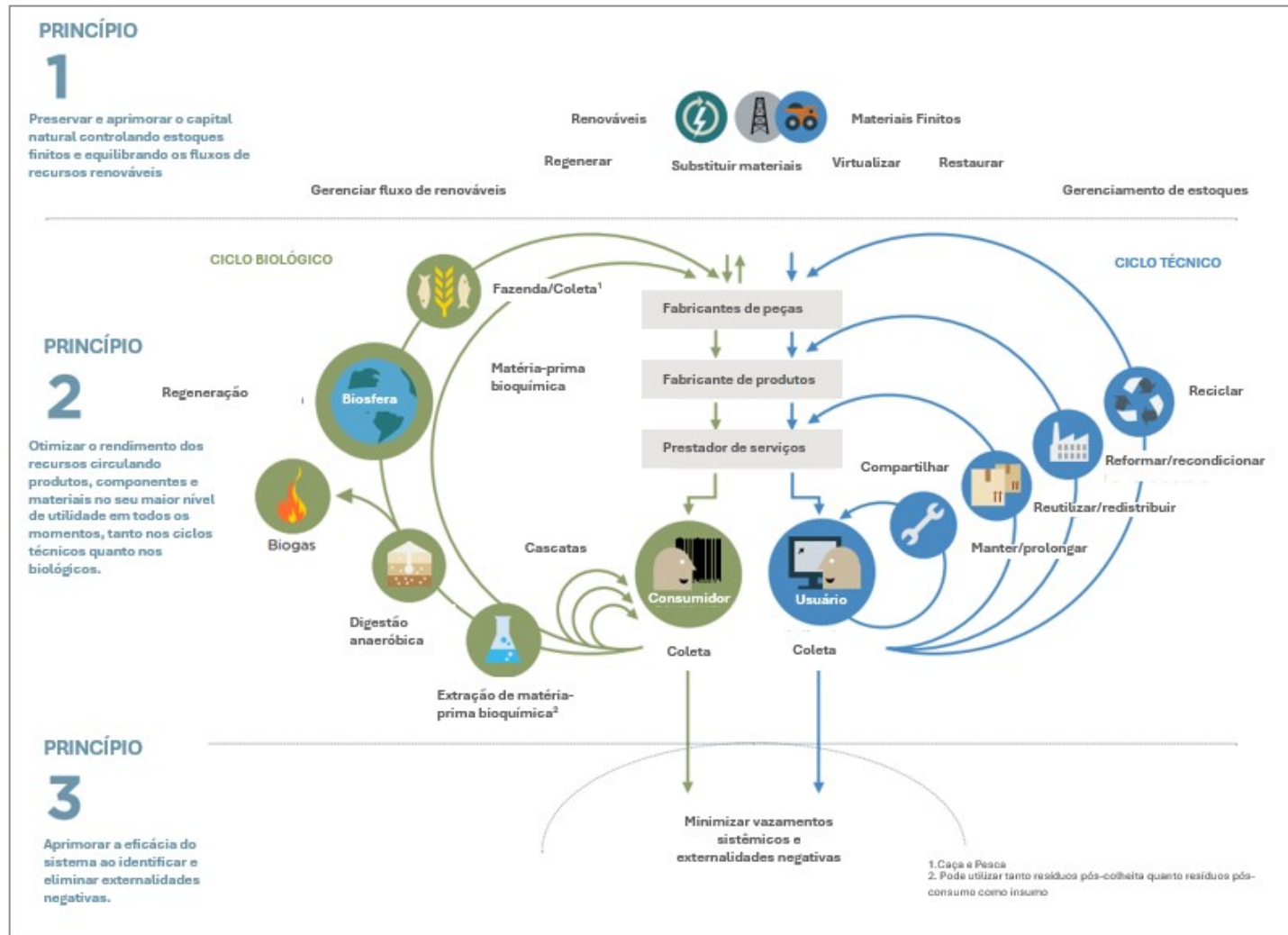
Segundo ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2015), dois ciclos principais que compõem a economia circular: o ciclo biológico e o ciclo técnico, cada um desempenhando um papel fundamental na promoção da sustentabilidade e na maximização do valor dos recursos, conforme apresentado na Figura 9. O ciclo biológico envolve materiais renováveis que podem ser regenerados. Exemplos incluem alimentos, produtos de papel e materiais biodegradáveis. O foco nesse ciclo é a regeneração dos recursos, em que os nutrientes biológicos são devolvidos ao solo por meio de processos como compostagem ou digestão anaeróbica, garantindo que os materiais possam ser continuamente utilizados e renovados, promovendo a saúde dos ecossistemas. Por outro lado, o ciclo técnico lida com materiais finitos que precisam ser geridos de maneira a maximizar seu uso e valor. Isso inclui produtos feitos de metais, plásticos e outros materiais que não se degradam facilmente. O objetivo neste ciclo é evitar o desperdício e garantir que os materiais sejam recuperados, restaurados e reciclados. Além disso, os produtos são projetados para serem desmontados e reutilizados, permitindo que os componentes técnicos sejam mantidos em circulação na economia, em vez de serem descartados após o uso. A interconexão entre esses ciclos é fundamental para a economia circular, pois permite que os recursos sejam utilizados de maneira eficiente e sustentável, minimizando o desperdício e promovendo a regeneração dos ecossistemas.

De acordo com o CIRCLE ECONOMY (2023), os materiais que são reciclados de volta à economia global após o fim de sua vida útil, também conhecidos como materiais secundários, representaram em 2023, 7,2% de todos os insumos materiais na economia – esta é a Métrica de Circularidade. Isso significa que a economia global é de apenas 7,2% circular, indicando uma queda em relação aos 9,1% em 2018. Também indica que mais de 90% dos materiais são desperdiçados, perdidos ou permanecem indisponíveis para reutilização por anos, pois estão presos em estoques duradouros, como edifícios e máquinas, fazendo com que ocorra um aumento da extração e uso de materiais virgens. Para reverter este cenário com soluções circulares,

quatro sistemas-chave são necessários: *narrow* (reduzir), *slow* (usar por mais tempo), *regenerate* (regenerar) e *cycle* (reutilizar).

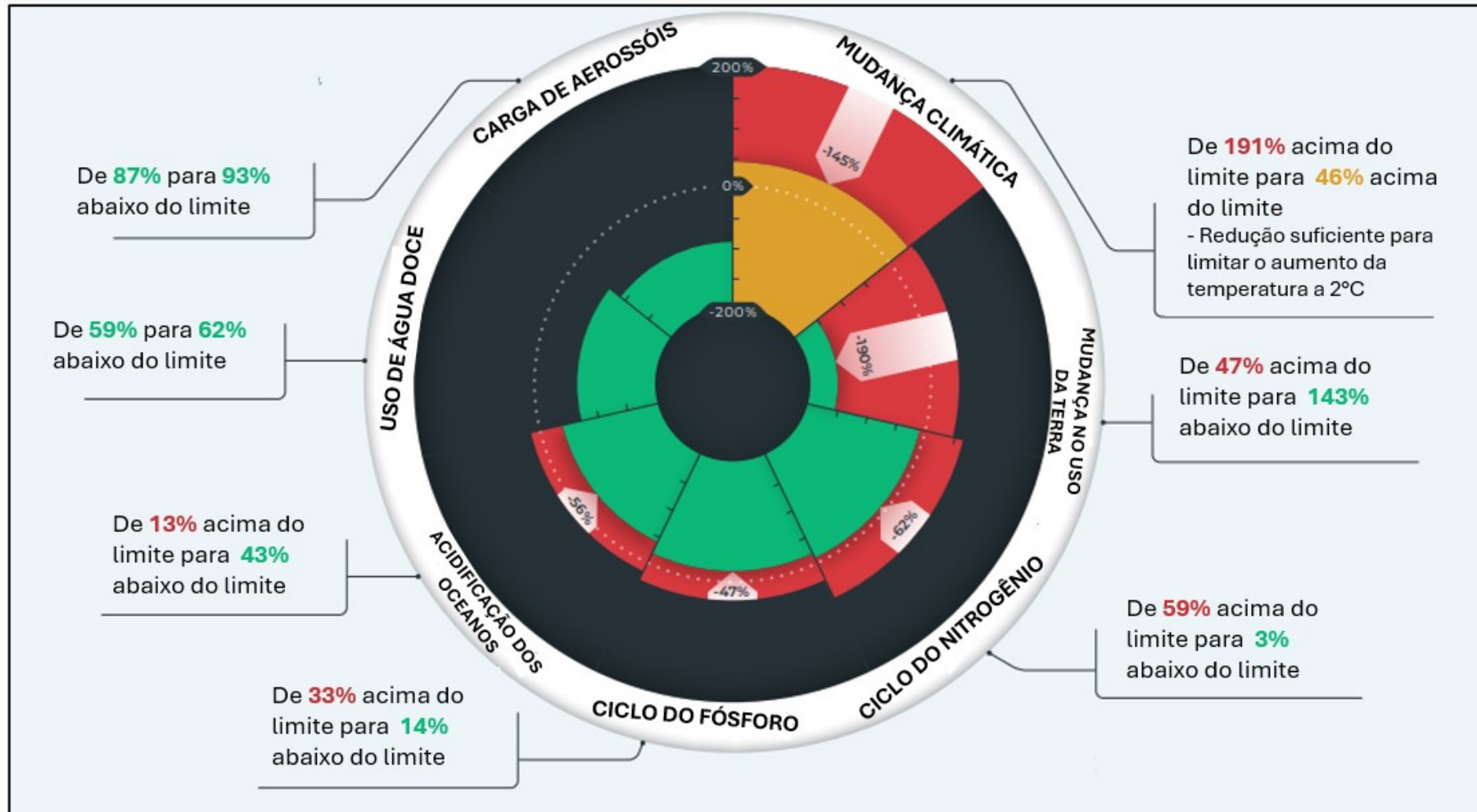
O estudo apresentado no CIRCLE ECONOMY (2023) afirma que a implementação de uma economia circular por meio de soluções circulares adotando os conceitos mencionados acima em quatro sistemas globais pode reduzir a extração de materiais virgens em cerca de 34%, passando de 92,7 bilhões de toneladas para 61,2 bilhões de toneladas, e ressalta o potencial transformador dessa abordagem na gestão de recursos naturais. Os quatro sistemas incluem os sistemas alimentares, o ambiente construído, os bens fabricados e consumíveis e, a mobilidade e transporte. Nos sistemas alimentares, práticas circulares podem reduzir o desperdício e promover métodos agrícolas sustentáveis, melhorando a eficiência no uso de recursos. No ambiente construído, a reutilização de materiais e a renovação de edificações existentes minimizam a necessidade de novos insumos. Para os bens fabricados, a economia circular incentiva a produção de produtos duráveis e recicláveis, diminuindo a dependência de materiais virgens. Por fim, na mobilidade e transporte, a promoção de veículos elétricos e o compartilhamento de transporte contribuem para uma utilização mais eficiente dos recursos. Com essa transição para economia circular, seria possível reverter a superação dos limites planetários conforme apresentado na Figura 10.

Figura 9 – Proposta da Economia Circular



Fonte: Adaptado de ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2015).

Figura 10 – Soluções circulares têm o poder de reverter a ultrapassagem dos limites planetários



Fonte: Adaptado de CIRCLE ECONOMY (2023)

Segundo ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2024), para atingir as emissões de GEE líquidas a zero, além da eficiência energética e a mudança para energia renovável, também será necessário mudar a maneira como é fabricado e como são usados produtos, materiais e alimentos. Para alcançar este resultado, devemos promover a Economia Circular e seus princípios. A economia circular pode ser definida como uma estrutura de solução de sistemas que aborda desafios globais como mudanças climáticas, perda de biodiversidade, resíduos e poluição. Baseia-se em três princípios, impulsionados pelo *design*: Eliminar o desperdício e a poluição, circular produtos e materiais (em seu valor mais alto) e regenerar a natureza. A redução de GEE por meio da adoção dos princípios da economia circular ocorre porque, ao eliminar o desperdício e a poluição, reduzimos as emissões de gases de efeito estufa em toda a cadeia de valor; ao circular produtos e materiais, retemos sua energia incorporada; e, ao regenerar a natureza, sequestramos carbono no solo e nos produtos.

Adoção do *design* para a circularidade na implementação de novos projetos e produtos, é outro fator fundamental na transição para uma economia circular, pois estabelece as bases para a sustentabilidade ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos. Ao incorporar princípios de circularidade desde a fase de concepção, os designers podem criar produtos que não apenas atendem às necessidades dos consumidores, mas também são projetados para serem duráveis, reparáveis e recicláveis. Isso significa que, em vez de serem descartados após o uso, os produtos podem ser facilmente desmontados e seus materiais recuperados, reduzindo a demanda por novos recursos e minimizando o desperdício. Além disso, o *design* para a circularidade promove a inovação, incentivando a utilização de materiais sustentáveis e a adoção de novas tecnologias que favorecem a eficiência e a regeneração dos ecossistemas (OMETTO; SARKIS; EVANS, 2024).

Nesse contexto, o pensamento do ciclo de vida (*Life Cycle Thinking*) destaca-se como uma ferramenta essencial para viabilizar essa transição para economia circular. A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) considera todos os impactos ambientais associados a produtos e serviços ao longo de seu ciclo de vida, abrangendo desde a extração de matérias-primas, passando pela produção e distribuição, até o uso e descarte final. Ao integrar essa visão sistêmica, é possível identificar e implementar soluções que reduzem os impactos ambientais, otimizam o uso de recursos e promovem práticas sustentáveis (LIFE CYCLE INITIATIVE, 2024).

Por exemplo, para descobrir qual a melhor estratégia para reciclagem, reutilização e outras opções de recuperação no final da vida útil, a ACV é uma ferramenta excelente para avaliar alternativas e quantificar resultados. Neste sentido, os desenvolvedores de produtos podem avaliar o impacto ambiental de diferentes configurações de produtos e cadeias de suprimentos, comparar

estratégias circulares e assegurar um equilíbrio ambiental positivo desde a concepção de novos produtos ou serviços circulares. Em resumo, a ACV pode complementar as ações para economia circular atuando em 3 principais pontos: 1) Testar as suposições dos modelos de negócio de ciclo fechado; 2) Apresentar as limitações de alguns modelos de economia circular e fomentar novas alternativas; e 3) Guiar objetivos e metas quantificáveis para a economia circular. Essas são análises extremamente importantes se os resultados forem usados para investimentos que podem levar vários anos para se materializar (INGEMARSDOTTER EMILIA E DUMONT, 2022).

3.5 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que surgiu como resposta à crescente preocupação com os impactos ambientais das atividades humanas e dos produtos que consumimos. O desenvolvimento dessa metodologia começou nas décadas de 1960 e 1970, quando a necessidade de avaliar o impacto ambiental de produtos e processos se tornou evidente. Inicialmente, as análises eram realizadas de forma mais simplificada, focando em etapas específicas do ciclo de vida, como a produção ou o descarte. Com o tempo, a ACV evoluiu para uma abordagem mais holística, considerando todas as fases do ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas até a disposição final (HAUSCHILD M.; JESWIET, 2005).

A padronização da metodologia foi impulsionada por organizações como a ISO, que publicou a norma ISO 14040 em 1997, estabelecendo diretrizes para a realização de ACVs. Essa norma ajudou a legitimar a ACV como uma ferramenta essencial para a gestão ambiental e a tomada de decisões sustentáveis. A ACV é orientada pelas normas ISO 14.040 e ISO 14.044, que são parte da família ISO 14.000 destinada a apoiar a gestão ambiental em organizações. A norma ISO 14040 estabelece os princípios e a estrutura geral para a avaliação do ciclo de vida, já a norma ISO 14044 complementa a ISO 14040, fornecendo requisitos mais detalhados e diretrizes para a realização de uma ACV (JOLLIET et al., 2016).

A ACV é uma ferramenta essencial para avaliar os impactos ambientais de produtos e processos ao longo de todo o seu ciclo de vida. No entanto, ela não opera isoladamente; está interligada a diversas normas que complementam e expandem sua aplicação. As normas relacionadas à rotulagem ambiental, gestão de Gases de Efeito Estufa (GEE) e gestão ambiental fornecem diretrizes específicas que ajudam a integrar a ACV em diferentes contextos e setores. Essas normas abordam desde a rotulagem de produtos com base em critérios ambientais até a quantificação e relato de emissões de GEE, passando pela gestão de recursos hídricos e a

integração do *ecodesign*. Normas como as de rotulagem ambiental (ISO 14024, ISO 14021, ISO 14025) e as declarações ambientais de produtos de construção (ISO 21930, EN 15804) são exemplos de como as empresas podem comunicar de forma clara e confiável o desempenho ambiental de seus produtos. Além disso, normas de gestão de GEE (ISO 14064, ISO 14069, ISO 14067) e de gestão ambiental (ISO 14072, ISO 14046, ISO 14006) ajudam as organizações a medir, relatar e melhorar continuamente seu impacto ambiental. O Quadro 2 a seguir apresenta uma comparação dessas normas, destacando suas descrições, objetivos e aplicações.

Quadro 2 – Normas Relacionadas à ACV, Gestão de GEE e Gestão Ambiental.

Norma	Descrição	Objetivo	Aplicação
ISO 14024:2018	Princípios e procedimentos para rotulagem ambiental Tipo I	Estabelecer critérios ambientais para produtos e conceder rótulos ecológicos	Produtos que atendem a critérios ambientais específicos
ISO 14021:2016	Requisitos para autodeclarações ambientais (Tipo II)	Fornecer diretrizes para autodeclarações ambientais	Produtos com declarações ambientais feitas pelos próprios fabricantes
ISO 14025:2015	Declarações ambientais Tipo III	Estabelecer princípios para declarações ambientais baseadas em ACV	Produtos com declarações verificadas por terceiros
ISO 21930:2017	Declarações ambientais de produtos de construção	Regras para declarações ambientais de produtos de construção	Produtos e serviços de construção
EN 15804:2019	Declarações ambientais de produtos de construção	Regras para declarações ambientais de produtos de construção na Europa	Produtos e serviços de construção na Europa
ISO 14064-1:2018, ISO 14069-2:2019	Quantificação e relato de emissões e remoções de GEE	Fornecer diretrizes para inventários de GEE	Organizações que desejam medir e relatar suas emissões de GEE
ISO 14067:2018	Pegada de carbono de produtos	Requisitos e diretrizes para quantificação da pegada de carbono	Produtos ao longo de seu ciclo de vida
ISO 14072:2024	Avaliação do ciclo de vida organizacional	Requisitos e diretrizes para ACV em nível organizacional	Organizações que desejam aplicar ACV em suas operações
ISO 14046:2014	Pegada hídrica	Princípios, requisitos e diretrizes para avaliação da pegada hídrica	Produtos, processos e organizações
ISO 14006:2020	Diretrizes para a integração do <i>ecodesign</i>	Fornecer diretrizes para integrar o <i>ecodesign</i> em sistemas de gestão ambiental	Organizações que desejam incorporar práticas de <i>ecodesign</i> em seus processos

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Os órgãos certificadores de rotulagem tipo III desempenham um papel crucial na promoção da transparência e sustentabilidade ambiental, verificando e validando as Declarações Ambientais de Produto (DAPs). Essas declarações fornecem informações detalhadas sobre o impacto ambiental de um produto ao longo de seu ciclo de vida, utilizando a metodologia de ACV conforme normas internacionais como a ISO 14040 e 14044. Entre os principais programas de certificação estão o *EPD System*, operado pela *EPD International AB*, o IBU (*Institut Bauen und Umwelt e.V.*) na Alemanha, o Inmetro no Brasil, a *UL Environment*, a *Global Ecolabelling Network* (GEN) e a AENOR na Espanha. Esses programas seguem normas rigorosas para garantir a precisão e comparabilidade dos dados, promovendo assim escolhas mais informadas e responsáveis por parte de consumidores e empresas.

Além disso, as Regras de Categoria de Produto (PCR – *Product Category Rules*) são fundamentais para a elaboração das DAPs. As PCRs definem as regras e os requisitos específicos para cada categoria de produto, garantindo que as avaliações sejam consistentes e comparáveis. Elas são uma parte essencial da ISO 14025 e permitem que as DAPs sejam desenvolvidas de maneira padronizada, facilitando a transparência e a confiabilidade das informações ambientais. A Comissão Europeia, por exemplo, desenvolveu métodos de Pegada Ambiental de Produto (PEF – *Product Environmental Footprint*) que fornecem diretrizes detalhadas para modelar, calcular e relatar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos, promovendo uma economia mais sustentável. Esses órgãos certificadores não apenas asseguram a conformidade com as normas, mas também incentivam a melhoria contínua dos processos produtivos e a inovação em tecnologias sustentáveis. Ao fornecer uma base confiável e padronizada para a avaliação do desempenho ambiental, eles ajudam a construir um mercado mais transparente e competitivo, em que a sustentabilidade é valorizada e recompensada. Dessa forma, as empresas podem se destacar no mercado global, atendendo às demandas crescentes por produtos ambientalmente responsáveis e contribuindo para a redução dos impactos ambientais em escala global (COMISSÃO EUROPEIA, 2024).

Avanços importantes no cenário mundial no âmbito de estudos de ACV, são considerados no relatório *Life Cycle Initiative Progress Report*, elaborado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) em colaboração com uma ampla gama de *stakeholders*, incluindo governos, empresas e organizações da sociedade civil. O relatório apresenta um panorama abrangente das atividades e progressos na promoção da ACV em 2023. Entre os principais pontos abordados no relatório estão a criação de ferramentas como o *Global Life Cycle Assessment Data Access network* (GLAD) e o *Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators and*

Methods (GLAM), que visam facilitar o acesso a dados e metodologias de ACV. Os resultados de 2023 refletem um avanço significativo na adoção de práticas de ACV, com um aumento no engajamento de *stakeholders* e na aplicação de abordagens de ciclo de vida em políticas públicas, evidenciando a relevância da ACV na promoção de um desenvolvimento sustentável global (UNEP, 2023).

Estudos com abordagem ACV são considerados promissores para avaliar os impactos das políticas de *ecodesign*. A diretiva *Ecodesign* da União Europeia nº 2009/125/EC, lançada em 21 de outubro de 2009, por exemplo, estabelece um quadro para a definição de requisitos de *ecodesign* aplicáveis a produtos relacionados à energia, visando melhorar a eficiência energética e reduzir o impacto ambiental desses produtos ao longo de seu ciclo de vida. Nos últimos anos, houve um aumento nas exigências relacionadas à economia circular dentro dessa diretiva, refletindo a crescente preocupação com a sustentabilidade e a gestão eficiente de recursos (OMETTO; SARKIS; EVANS, 2024).

Segundo CRUZ (2020), existe um crescimento significativo no interesse acadêmico em realização de estudos de ACV no Brasil. Diversas universidades e instituições de pesquisa, além de empresas e consultorias envolvidas, demonstram uma ampla base de apoio e colaboração, enriquecendo a pesquisa e a aplicação da metodologia. Além disso, a realização de congressos e conferências sobre ACV contribui para a disseminação de conhecimento e a troca de experiências, enquanto o reconhecimento internacional das publicações brasileiras posiciona o país no cenário global em relação à pesquisa e aplicação da ACV, atraindo mais atenção e investimentos para a área.

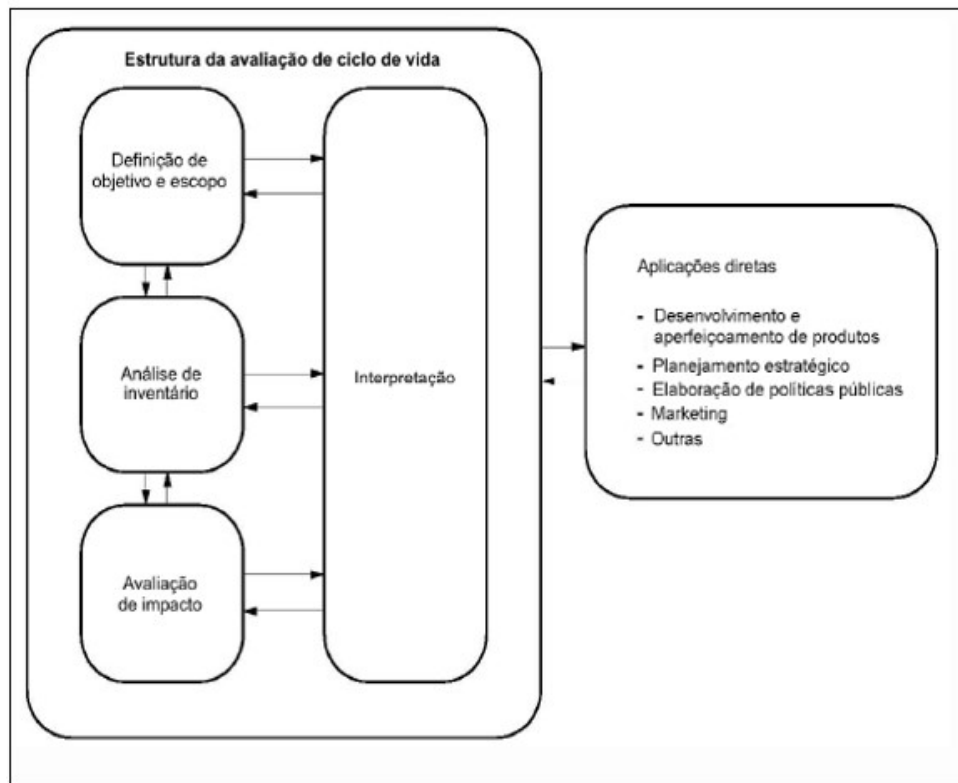
Exemplos de aplicação de ACV no Brasil, estão na implementação da Lei do Combustível do Futuro quanto no Decreto nº 12.063, de 18 de junho de 2024, que institui o Programa Selo Verde Brasil. A Lei do Combustível do Futuro incentiva o uso de biocombustíveis e combustíveis de menor impacto ambiental, promovendo uma transição energética em que a ACV serve para quantificar as emissões e impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos combustíveis, desde a produção até o uso final, comprovando os benefícios de alternativas renováveis em comparação aos combustíveis fósseis (BRASIL, 2022). Simultaneamente, o Decreto nº 11.123, publicado em junho de 2024, institui o Programa Selo Verde Brasil, que visa certificar produtos e serviços sustentáveis, incentivando a adoção de práticas que minimizem impactos ambientais por meio de execução de estudo de ACV. Ambos os instrumentos legislativos utilizam a ACV como base para garantir que as práticas adotadas sejam efetivas na redução das emissões e na promoção da sustentabilidade, alinhando-se às metas de desenvolvimento sustentável do país (BRASIL, 2024).

3.5.1 Etapas de elaboração de um estudo de ACV

O processo de ACV é dividido em quatro fases principais, sendo: Definição de objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e interpretação dos resultados. A fase de definição de objetivo e escopo determina a motivação para o estudo e define o sistema de produto a ser analisado. Esta fase estabelece a unidade funcional que quantifica o desempenho do sistema, também estabelece os limites do sistema que delimitam quais processos serão considerados na ACV. O ICV é a fase em que se coletam dados sobre todos os processos envolvidos no sistema de produto. A fase de AICV tem como propósito fornecer informações complementares com o intuito de compreender melhor a relevância ambiental dos impactos associados ao sistema de produto analisado. Por fim, a fase de interpretação envolve analisar os resultados acumulados para formular conclusões e recomendações que estejam alinhadas com os objetivos inicialmente propostos (ABNT NBR ISO 14040, 2025).

A interação entre as setas apresentada na Figura 11, representa como essas quatro etapas são dinâmicas justamente porque o processo de ACV não é linear. O estudo pode, e frequentemente deve, ser revisitado em diferentes pontos durante seu desenvolvimento, para garantir precisão e relevância. Isso cria um ciclo iterativo no qual uma fase influencia a outra, promovendo ajustes contínuos ao longo de todo o processo (ABNT NBR ISO 14040, 2025).

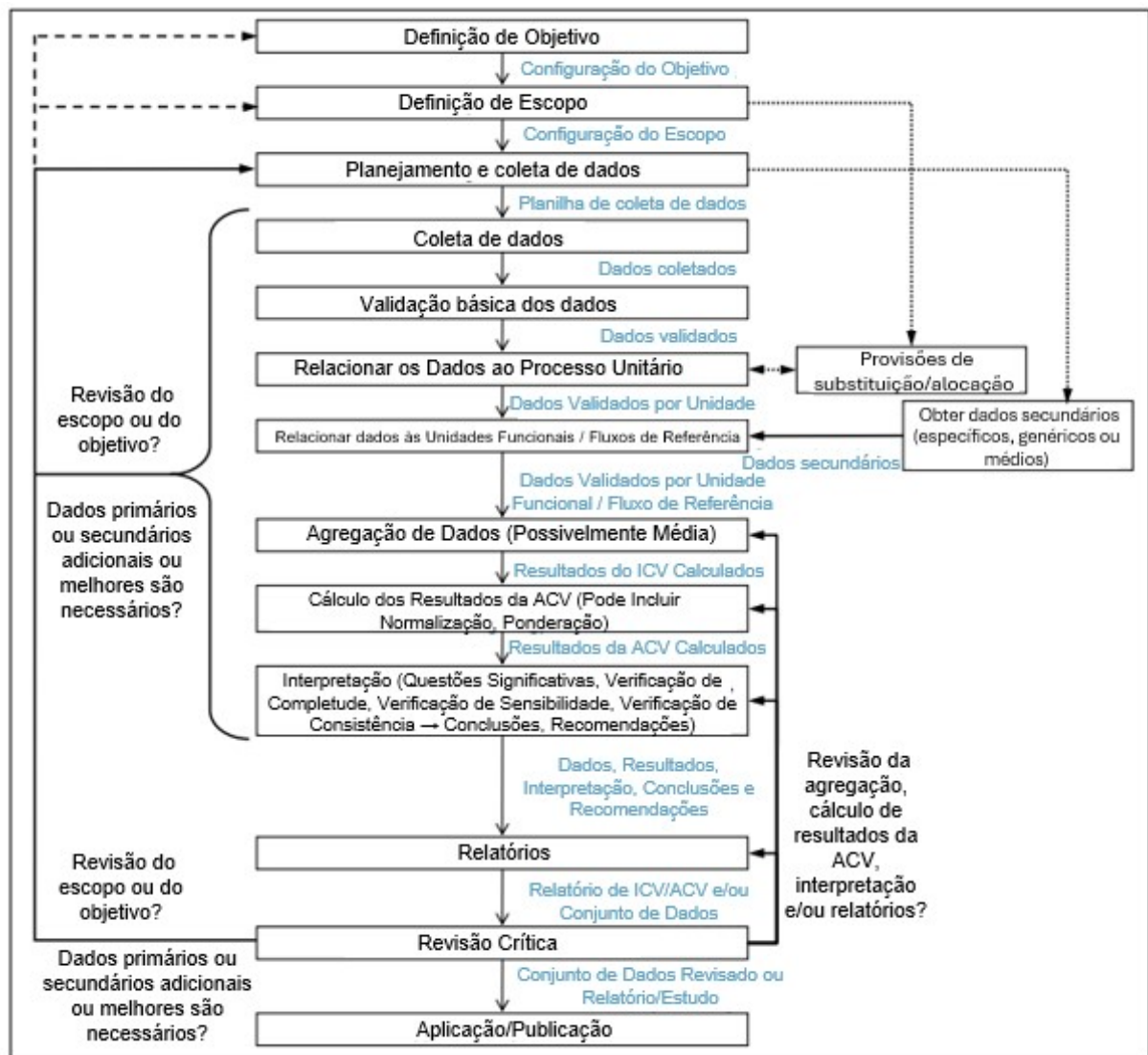
Figura 11 – Fases de uma ACV



Fonte: (ABNT NBR ISO 14040, 2025)

Segundo a EUROPEAN COMMISSION (2010b), em "*International Reference Life Cycle Data System Handbook*"- documento elaborado pela Comissão Europeia que fornece diretrizes abrangentes para estudos de ACV, a abordagem iterativa é fundamental para a execução deste tipo de estudo. A Figura 12 ilustra o processo iterativo que acontece em uma ACV. Essa figura apresenta um diagrama que representa as diferentes fases do processo, que são dispostas em um ciclo, indicando que cada uma delas pode influenciar as demais.

Figura 12 – Abordagem iterativa na ACV



Fonte: Adaptado de EUROPEAN COMMISSION (2010b)

Um dos aspectos mais importantes destacados na Figura 12 é a presença de um ciclo de *feedback*, em que setas ou linhas conectam as fases, simbolizando que os resultados obtidos em uma fase podem levar a revisões em fases anteriores. Por exemplo, a análise de impacto pode revelar a necessidade de coletar dados adicionais, o que, por sua vez, pode resultar em uma revisão do inventário. Além disso, a importância da documentação e da revisão ao longo do processo são enfatizadas. A documentação deve ser considerada um recurso vivo, que deve ser atualizada conforme o estudo avança, garantindo que todas as decisões e dados sejam registrados de forma adequada. Por fim, a figura pode incluir exemplos que ilustram como questões identificadas em uma fase, como a necessidade de dados mais representativos, podem levar a revisões na definição do escopo ou na coleta de dados. Esses elementos ajudam a visualizar a ACV como um processo

dinâmico e adaptável, no qual a melhoria contínua é parte essencial do trabalho (EUROPEAN COMMISSION, 2010b).

Devido à complexidade da ACV, a transparência é fundamental para assegurar que todas as etapas, desde a coleta de dados até a interpretação dos resultados, sejam claramente documentadas e acessíveis, permitindo uma verificação rigorosa e garantindo que as decisões baseadas no ACV sejam tomadas com confiança e responsabilidade (ABNT NBR ISO 14040, 2025)).

Diversos *softwares* podem ser utilizados para realização de estudos de ACV, pois desempenham um papel crucial na análise e quantificação dos impactos ambientais associados a produtos e processos. Esses *softwares* podem prover avaliações detalhadas, considerando todas as etapas do ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até o descarte final. Os principais *softwares* incluem: GaBi, SimaPro, OpenLCA, Umberto, Earthster 2 Turbo, CMLCA, BEES 4.0, ECO-BAT 4.0, GEMIS e LEGEP. Cada um deles possui características únicas que atendem a diferentes necessidades de análise. Por exemplo, o GaBi e o SimaPro são amplamente utilizados devido à sua robustez e à variedade de dados disponíveis, enquanto o OpenLCA se destaca por ser uma opção de código aberto, facilitando o acesso e a personalização. O Earthster 2 Turbo, por sua vez, representa uma nova abordagem como Software as a Service (SaaS), permitindo atualizações em tempo real e colaboração entre usuários. A importância desses *softwares* está na capacidade de fornecer informações precisas e abrangentes sobre os impactos ambientais, ajudando as organizações a tomar decisões mais informadas e sustentáveis em suas operações e produtos (ORMAZABAL; JACA; PUGA-LEAL, 2014).

3.5.1.1 Objetivo e Escopo da ACV

A definição precisa do objetivo e escopo é crucial para garantir a relevância e a precisão dos resultados. Nesta etapa devem estar claros a aplicação, a razão do estudo, o público-alvo, a intenção de comparação pública, as suposições e limitações, os requisitos de qualidade e o tipo de revisão a ser realizada (HEYDENRYCH, 2024).

O objetivo de uma ACV pode variar desde a identificação de pontos críticos de impacto ambiental (*hotspots*) até a comparação de alternativas para apoiar decisões de *design* ou políticas ambientais. O escopo também define claramente os limites ou fronteiras do sistema, ou seja, quais etapas estão incluídas ou excluídas, e solucionadas as questões de multifuncionalidade (por meio de alocação, subdivisão, expansão ou substituição) (CRUZ, 2020).

Também é na etapa de objetivo e escopo que é determinada a unidade funcional do estudo. A unidade funcional é uma medida quantitativa da funcionalidade ou serviço específico fornecido pelo sistema em análise. Em outras palavras, é uma referência que define a quantidade de produto ou processo que está sendo avaliada. Resultados de impactos como o de mudanças climáticas serão medidos apenas na unidade funcional a qual a ACV está sendo executada (ABNT NBR ISO 14040, 2025). Por exemplo, no estudo "Análise da escala ótima do sistema de resfriamento, aquecimento e energia combinados (CCHP – sigla em inglês para *Com-bined Cooling, Heating, and Power*) baseado na gaseificação de biomassa, realizado por YANG K.; ZHU (2017), a unidade funcional foi definida como a produção de 1 MWh de energia, que abrange a soma de resfriamento, aquecimento, eletricidade e água quente doméstica gerados pelo sistema de CCHP. Essa definição permite que os impactos ambientais e econômicos sejam avaliados de forma consistente e comparativa, considerando todos os serviços energéticos fornecidos pelo sistema em diferentes escalas de operação.

A delimitação das fronteiras ou limites do sistema deve ser feita com base na função do sistema, e não apenas em critérios geográficos. Isso significa que, ao comparar diferentes produtos ou sistemas, é importante garantir que todos os processos relevantes sejam considerados, independentemente de onde eles ocorrem. Por outro lado, é possível estabelecer critérios de corte para excluir processos menores que não têm um impacto significativo na análise (JOLLIET et al., 2016).

Para produtos e processos que compartilham um sistema comum, é importante estabelecer critérios de alocação na etapa de objetivo e escopo. De acordo com a ABNT NBR ISO 14044 (2009), a alocação ocorre quando múltiplos fluxos de produtos e/ou impactos ambientais estão associados a um único processo, e é necessário distribuir os impactos entre esses fluxos. A norma estabelece que a alocação deve ser feita de maneira transparente e justificada, sempre que possível, e as etapas e critérios utilizados devem ser documentados. A alocação pode ser feita de diferentes maneiras, dependendo da natureza do processo e dos dados disponíveis.

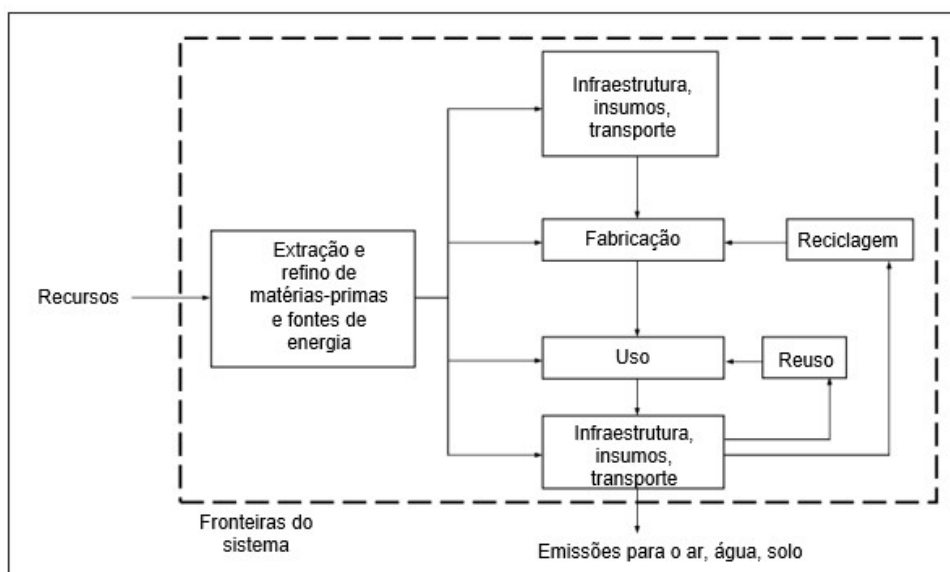
Os três tipos principais de alocação definidos pela ABNT NBR ISO 14040 (2025) e ABNT NBR ISO 14044 (2009) para distribuir os impactos ambientais entre múltiplos produtos ou processos são: alocação com base na função, que distribui os impactos de acordo com as funções ou unidades funcionais dos produtos gerados, como a quantidade produzida de cada produto; alocação com base na massa ou volume, em que os impactos são alocados de acordo com as quantidades físicas de cada produto ou fluxo, como a quantidade de massa ou volume gerado; e alocação com base no valor econômico, que distribui os impactos de acordo com o valor

de mercado dos produtos, refletindo a contribuição econômica de cada um para o sistema. Cada tipo de alocação deve ser escolhido com base na natureza do processo e nos dados disponíveis, visando uma distribuição justa e transparente dos impactos.

Outro ponto importante nesta etapa, são a escolha da metodologia AICV, os requisitos de qualidade dos dados a serem utilizados (fontes de dados e cobertura temporal, geográfica e tecnológica), pressupostos e limitações, tipo de revisão crítica e planejamento da comunicação dos resultados (CRUZ, 2020)).

De acordo com JOLLIET et al. (2016), os fluxogramas são ferramentas essenciais na etapa de definição de objetivo e escopo, como exemplificado na Figura 13, pois apresentam uma representação macro das etapas dos processos, das entradas e saídas, além das fronteiras do sistema. Esses fluxogramas são fundamentais para orientar e facilitar a execução da próxima etapa, a do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), oferecendo uma visão clara e estruturada do sistema em análise.

Figura 13 – Fluxograma representativo dos limites do sistema e dos processos em uma ACV



Fonte: Adaptado de Adaptado de JOLLIET et al. (2016)

3.5.1.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

A etapa de ICV se inicia depois de definir as fronteiras do sistema de produto. Esta etapa envolve a coleta e análise de todos os processos incluídos dentro dessas fronteiras dos dados sobre os fluxos de materiais e energia associados a um produto ao longo de seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até a disposição final. Isso inclui dados sobre a entrada de

recursos, como matérias-primas, componentes e energia, bem como a saída de emissões, resíduos e produtos gerados (HAUSCHILD M.; JESWIET, 2005).

Os dados de inventário são compilados para cada processo individual, permitindo quantificar as entradas e saídas relacionadas ao fluxo de referência dos produtos, conforme estabelecido pela unidade funcional. Esses dados são geralmente apresentados de maneira consolidada para o sistema de produto como um todo, indicando, por exemplo, as emissões totais de uma substância específica (X) ou o consumo total de um recurso (Y) por unidade funcional. Essa abordagem baseada na funcionalidade é um aspecto essencial do ICV e da subsequente avaliação de impacto ambiental. Ela está alinhada com o objetivo principal da ACV: avaliar os impactos ambientais associados ao serviço ou função especificada pela unidade funcional (HAUSCHILD M.; JESWIET, 2005).

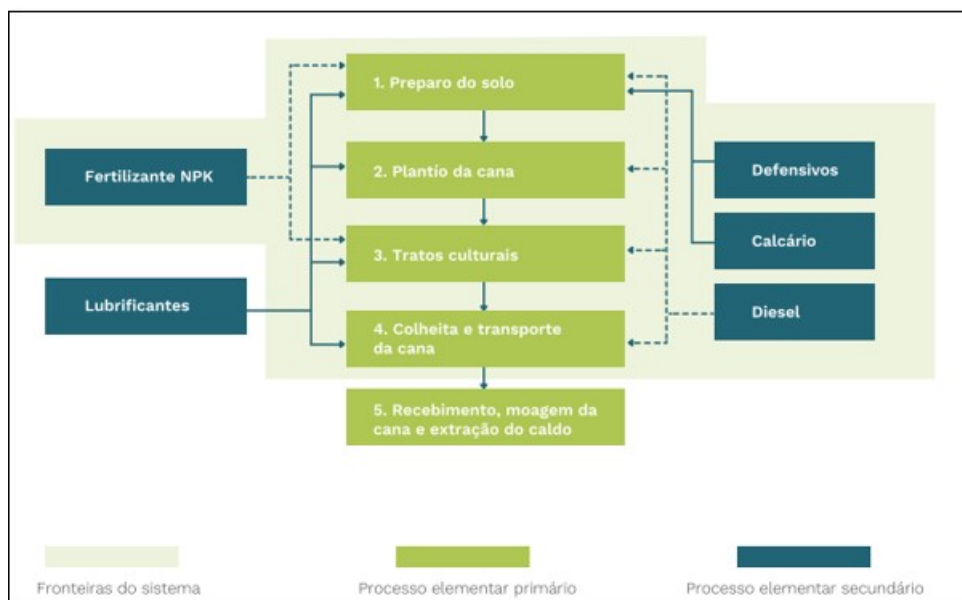
A coleta de dados é uma parte crucial para garantir a precisão e a relevância dos resultados da ACV. Os dados podem ser classificados em duas categorias principais: dados primários e dados secundários. Os dados primários são informações coletadas diretamente de fontes originais, como os próprios processos produtivos, operações e serviços. Esses dados são específicos para o sistema em análise e são obtidos através de medições, observações ou entrevistas. A coleta de dados primários é preferida porque fornece informações mais precisas e relevantes sobre o sistema em estudo, sendo especialmente importante para processos que não têm dados disponíveis em fontes secundárias ou quando a precisão é crítica para a análise. No entanto, a coleta de dados primários pode ser dispendiosa e demorada, exigindo recursos significativos para garantir que as medições sejam precisas e representativas (EUROPEAN COMMISSION, 2010b).

Por outro lado, os dados secundários são informações que já foram coletadas e publicadas por outras fontes. Esses dados podem ser utilizados para complementar ou validar os dados primários, especialmente quando a coleta de dados primários não é viável. As fontes de dados secundários incluem estudos anteriores e publicações científicas, bases de dados de indústrias e associações, relatórios de organizações governamentais e não governamentais, além de dados de literatura técnica e normas. Embora os dados secundários possam ser mais fáceis e rápidos de obter, eles podem não ser tão específicos ou precisos quanto os dados primários, o que torna importante avaliar a qualidade e a relevância dos dados secundários antes de usá-los na análise (European Commission, 2010).

Em muitos casos, uma combinação de dados primários e secundários é utilizada para obter uma visão mais completa e precisa do ciclo de vida do produto ou serviço (European Commission, 2010). A Figura 14, extraída do “Guia Qualidata: requisitos de qualidade de conjuntos de dados

para o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida de Produtos Brasileiros - SICV Brasil”, apresenta um exemplo de fluxograma de processo explicitando as fronteiras a combinação dos processos elementares utilizando dados primários e secundários (RODRIGUES et al., 2016).

Figura 14 – Exemplo de fluxograma de processo explicitando as fronteiras a combinação dos processos elementares utilizando dados primários e secundários



Fonte: RODRIGUES et al. (2016)

No Brasil, o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil) é uma iniciativa do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (Ibict) que visa organizar, armazenar e disseminar informações padronizadas sobre os inventários do ciclo de vida da produção industrial brasileira. Ele permite que representantes da academia, indústria e governo cadastrem e depositem seus inventários, que passam por revisões de qualidade e dados antes de serem disponibilizados publicamente. Dessa forma, esses dados podem ser consultados e utilizados em complementação ao ICV de vários estudos de ACV de produtos nacionais (SICV BRASIL, 2024).

Outro exemplo de base de dados secundárias bastante utilizada em estudos de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é a *Ecoinvent*. Embora não seja de acesso gratuito como a SICV, esta base de dados é reconhecida por ser a maior e mais transparente base de dados de processos unitários de ICV no mundo. Desde seu lançamento em 2003, a *Ecoinvent* tem sido continuamente atualizada, com a versão 3 introduzindo melhorias metodológicas e tecnológicas significativas, além de muitos novos conjuntos de dados. A versão 3 visa expandir o conteúdo da base de dados, apoiar a ACV regionalizada, oferecer múltiplos modelos de sistema e permitir a integração de

dados de diferentes regiões, reduzindo os esforços de manutenção (WERNET et al., 2016).

Nas bases de dados como a da *Ecoinvent*, os diferentes modelos de sistema podem ser classificados em duas categorias principais de modelagem: atribucional e consequencial, de acordo com a abordagem utilizada para tratar fluxos e alocações no inventário de ciclo de vida. Na modelagem atribucional encontram-se os modelos *Cut-off by Classification* e APOS (*Allocation at the Point of Substitution*). O *Cut-off by Classification* adota uma abordagem baseada em cortes, na qual materiais recicláveis são excluídos do sistema produtor sem encargos ambientais, focando apenas nos fluxos diretos associados ao produto principal. O APOS, por sua vez, expande os processos de alocação para incluir todos os tratamentos necessários aos subprodutos, mas ainda opera dentro do contexto atribucional, utilizando fatores de alocação para distribuir os impactos entre os produtos e subprodutos. Já a modelagem consequencial inclui o *Consequential System Model*, que utiliza uma abordagem baseada na substituição. Este modelo não realiza alocação como os modelos atribucionais. Em vez disso, resolve a multifuncionalidade creditando ou atribuindo encargos aos subprodutos com base nos impactos ambientais das atividades que eles substituem no mercado. Ele é utilizado para avaliar os impactos de mudanças no sistema, como variações na demanda ou oferta. Assim, enquanto os modelos atribucionais, como o *Cut-off* e o APOS, descrevem o estado atual do sistema e seus fluxos médios, o modelo consequencial busca capturar os efeitos dinâmicos de mudanças no sistema, como respostas do mercado e ajustes tecnológicos (WERNET et al., 2016).

Essas modelagens oferecem diferentes perspectivas e sua distinção é essencial para escolher o modelo adequado dependendo dos objetivos da avaliação de ciclo de vida, sendo que, embora a escolha da modelagem deva ser definida na etapa de objetivo e escopo do estudo, é no ICV que os *datasets* com a modelagem escolhida são utilizados para representar os fluxos de entrada e saída do sistema (WERNET et al., 2016)).

Por fim, é durante o ICV que são levantados os impactos ambientais associados a cada etapa do ciclo de vida, para posterior análise na etapa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV). O levantamento envolve a quantificação de emissões de gases de efeito estufa, poluentes atmosféricos, efluentes líquidos e resíduos sólidos, por exemplo. Essa análise ajuda a identificar os "pontos críticos", nos quais as intervenções podem ser mais eficazes para reduzir impactos ambientais e para informar decisões de design e produção que visem a melhoria da sustentabilidade (HAUSCHILD M.; JESWIET, 2005).

3.5.1.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

De acordo com a ABNT NBR ISO 14044 (2009), a etapa de AICV tem como objetivo compreender e avaliar a magnitude dos impactos ambientais potenciais associados aos fluxos de entrada e saída identificados na fase de ICV. Essa etapa transforma os dados coletados no inventário em informações significativas para a tomada de decisões. A norma estabelece que, obrigatoriamente, a AICV deve incluir a seleção das categorias de impacto e a classificação dos fluxos atribuídos a essas categorias.

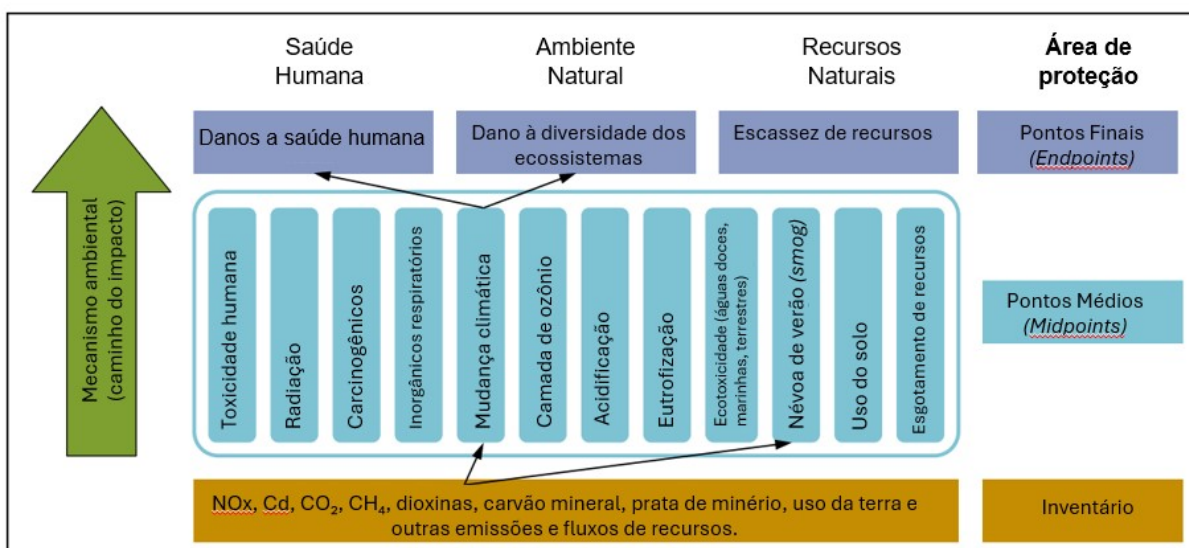
As categorias de impacto estão diretamente relacionadas aos métodos de análise de impacto na AICV, pois representam as áreas ambientais específicas avaliadas pelos métodos. Enquanto as categorias de impacto são os tópicos ou problemas ambientais que se deseja estudar (como mudança climática, acidificação dos oceanos ou toxicidade humana), os métodos de análise de impacto fornecem os modelos, cálculos e fatores de caracterização necessários para quantificar os efeitos de cada categoria (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016). Em outras palavras, os impactos ambientais são medidos de acordo com a capacidade que determinada substância tem de causar danos ao meio ambiente e à saúde humana. Quando uma substância poluente é emitida, sua concentração aumenta no meio ambiente e ela pode se transferir para outros compartimentos ambientais (ar, água, solo), ser bioacumulativa e ainda sofrer biomagnificação na cadeia alimentar; transformar-se em outras substâncias e, eventualmente, ser ingerida ou inalada por humanos ou outras espécies. Esse caminho de impacto, que inclui todos os processos ambientais desde a emissão da substância até seu impacto final, é modelado a partir de métodos de análise de impacto para ligar os dados de inventário aos danos ambientais potenciais por categoria de impacto (JOLLIET et al., 2016).

Os métodos de AICV se dividem em abordagens *midpoint* e *endpoint*. A abordagem *midpoint* utiliza indicadores localizados em estágios intermediários do mecanismo ambiental, como emissões de gases de efeito estufa que contribuem para o aquecimento global. Já a abordagem *endpoint* avalia os impactos até o dano final, como prejuízos à saúde humana ou perda de biodiversidade. Alguns métodos combinam essas abordagens para oferecer uma análise mais integrada (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016).

Os passos esquemáticos da AICV estão representados na Figura 15, desde a coleta de dados de inventário até os pontos finais das categorias de impacto. O processo começa com a coleta de dados de inventário, em que todas as entradas e saídas do sistema, como materiais, energia e emissões, são registradas. Em seguida, esses dados são classificados em diferentes

categorias de impacto ambiental, como mudanças climáticas, toxicidade humana e acidificação dos oceanos. Após a classificação, os dados são convertidos em indicadores de impacto ambiental por meio da caracterização, que utiliza fatores de caracterização para quantificar o potencial de impacto de cada substância. Opcionalmente, os resultados de caracterização podem ser normalizados para permitir a comparação entre diferentes categorias de impacto, ajustando os resultados para uma escala comum. Além disso, os impactos podem ser ponderados para refletir a importância relativa de cada categoria de impacto, ajudando a priorizar os impactos mais significativos (EUROPEAN COMMISSION, 2010a).

Figura 15 – Passos esquemáticos da AICV



Fonte: EUROPEAN COMMISSION (2010a).

A identificação de métodos adequados é uma etapa crucial para garantir a precisão e a relevância dos resultados obtidos. Os métodos escolhidos devem ser amplamente aceitos internacionalmente e, preferencialmente, endossados por órgãos governamentais relevantes. É fundamental que os indicadores de categoria selecionados sejam apropriados ao estudo e que lacunas na cobertura sejam documentadas e discutidas na interpretação dos resultados (EUROPEAN COMMISSION, 2010b).

Segundo estudo realizado por MENDES, BUENO e OMETTO (2016), alguns dos principais métodos existentes são: CML, Ecoindicator 99, Ecological Scarcity, EDIP, EPS 2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, MEEuP, ReCiPe, TRACI, USEtox, IMPACT World+. Embora não existam métodos especificamente desenvolvidos para o contexto do Brasil, diversos métodos internacionais são aplicados no país, sendo os recomendados aqueles que apresentam uma

abrangência classificada como global para o escopo de aplicação de suas categorias de impacto. O Quadro 3 apresenta o nível de avaliação, as categorias de impacto e a abrangência de aplicação de alguns destes métodos.

Quadro 3 – Exemplo de Categorias de impacto avaliadas pelos métodos de AICV de abrangência global.

Método	Nível de impacto	Categorias tradicionais	Abrangência	Categorias diferenciadas	Abrangência
CML 2002	Midpoint	Depleção de recursos abióticos	Global	Perda de função de suporte à vida	Global
		Depleção de recursos bióticos	Global	Perda de biodiversidade	Global
		Uso da terra	Global	Ecotoxicidade em água doce (sedimentos)	Global
		Mudança climática	Global	Ecotoxicidade marinha (sedimentos)	Global
		Depleção do ozônio estratosférico	Global	Impactos da radiação ionizante	Global
		Toxicidade humana	Global	Mau cheiro do ar	Global
		Ecotoxicidade aquática (água doce)	Global	Barulho	Global
		Ecotoxicidade aquática (marinha)	Global	Calor residual	Global
		Ecotoxicidade terrestre	Global	Acidentes	Global
		Formação de foto-oxidantes	Europa	Letais	Global
		Acidificação	Europa	Não letais	Global
		Eutrofização	Global	Dessecação	Global
EDIP 1997	Midpoint			Mau cheiro da água	Global
		Aquecimento global	Global	Ambiente de trabalho	Global
		Depleção de ozônio	Global		
		Acidificação	Global		
		Enriquecimento de nutrientes	Global		
		Formação de ozônio fotoquímico	Global		
		Toxicidade humana	Global		
		Ecotoxicidade	Global		
ESP 2000	Endpoint	Consumo de recursos	Global		
		Saúde humana	Global	Expectativa de vida	Global
		Consumo de recursos naturais	Global	Morbidade grave e sofrimento	Global
		Esgotamento de reservas de elementos	Global	Morbidade	Global
		Esgotamento de reservas fósseis (gás)	Global	Incômodo grave	Global
		Esgotamento de reservas fósseis (petróleo)	Global	Incômodo	Global
		Esgotamento de reservas fósseis (carvão)	Global	Ambiente natural	Global
		Esgotamento de reservas minerais	Global	Capacidade de produção agrícola	Global
				Capacidade de produção de madeira	Global
				Capacidade de produção de peixe e carne	Global
				Capacidade de cátions de base	Global
				Capacidade de produção de água potável	Global
				Parcela de extinção de espécies	Suécia
USEtox	Midpoint	Toxicidade humana	Global		
		Ecotoxicidade de água doce	Global		
IMPACT World+	Combinado	Toxicidade humana	Global		
		Oxidação fotoquímica	Global		
		Depleção da camada de ozônio	Global		
		Aquecimento global	Global		
		Ecotoxicidade	Global		
		Acidificação	Global		
		Eutrofização	Global		
		Uso da água	Global		
		Uso da terra	Global		
		Uso de recursos	Global		

Fonte: Mendes, Bueno e Ometto (2016).

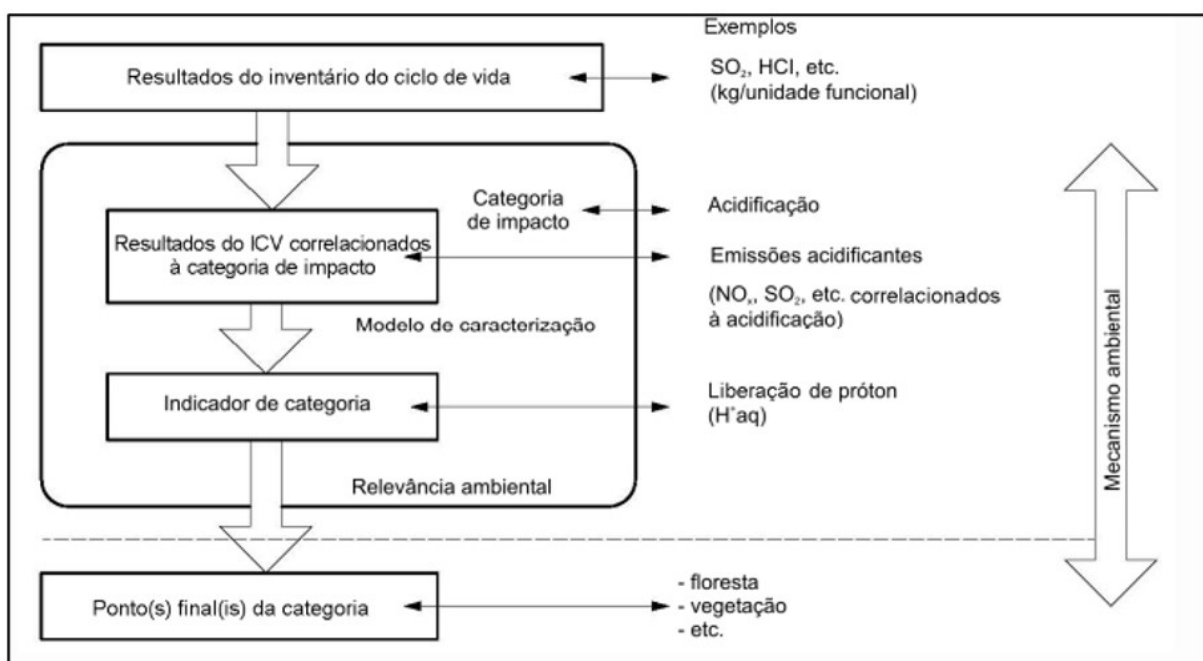
Cada categoria de impacto deve apresentar o resultado por meio de indicador de categoria de impacto, que ajuda a quantificar a contribuição de cada fluxo para os impactos ambientais. Por exemplo, na categoria de mudança climática, o indicador amplamente utilizado é o Potencial de Aquecimento Global (GWP – *Global Warming Potential*), expresso em equivalentes de dióxido de carbono (CO₂e). Esse indicador permite quantificar os impactos das emissões de gases de efeito estufa, como CO₂, CH₄ e N₂O, em uma unidade comum que facilita a comparação e a interpretação dos resultados. Outros exemplos incluem o Potencial de Eutrofização, expresso em equivalentes de fósforo (PO₄³⁻ eq), e o Potencial de Depleção de Ozônio (ODP – *Ozone Depletion Potential*), expresso em equivalentes de CFC-11 (European Commission, 2010). A Figura 16 extraída da ABNT NBR ISO 14044 (2009), ilustra o conceito de indicador de categoria de impacto.

Além disso, os critérios adotados para cada categoria de impacto podem ser resumidos da seguinte forma (EUROPEAN COMMISSION, 2010a):

- **Mudança climática:** Potencial de Aquecimento Global (GWP), baseado nos fatores do IPCC para 100 anos, em kg CO₂-eq.
- **Depleção da camada de ozônio:** Potencial de Depleção de Ozônio (ODP), expresso em kg CFC-11-eq.
- **Acidificação:** Excedente acumulado de cargas ácidas, em mol H⁺-eq.
- **Eutrofização terrestre:** Nitrogênio como fator limitante, expresso em kg N-eq.
- **Eutrofização aquática:**
 - Água doce: fósforo como fator limitante, em kg P-eq.
 - Marinha: nitrogênio como fator limitante, em kg N-eq.
- **Toxicidade humana (câncer e não câncer):** fatores USEtox, expressos em Unidades Tóxicas Comparativas para humanos (CTUh).
- **Ecotoxicidade em água doce:** fatores USEtox, em Unidades Tóxicas Comparativas para ecossistemas (CTUe).
- **Formação de ozônio fotoquímico:** Potencial de Criação de Ozônio Fotoquímico (POCP), em kg C₂H₄-eq.

- **Material particulado/Respiratórios inorgânicos:** efeitos de partículas inaláveis, em kg PM_{2.5}-eq.
- **Radiação ionizante:** potencial de radiação, em kg U²³⁵-eq.
- **Uso da terra:**
 - *Midpoint:* déficit de carbono orgânico do solo (SOM).
 - *Endpoint:* perda potencial de espécies (PDF).
- **Depleção de recursos hídricos:** equivalentes de consumo de água, em m³-eq.
- **Depleção de recursos minerais e fósseis:** Potencial de Depleção Abiótica (ADP), em kg Sb-eq.

Figura 16 – Conceito de indicadores de categoria



Fonte: ABNT NBR ISO 14044 (2009).

Por fim, a AICV deve ser documentada de forma clara e transparente, permitindo que os resultados sejam compreendidos e utilizados pelas diferentes partes interessadas. A comunicação dos resultados da AICV é essencial para garantir que as informações sejam acessíveis e úteis para a tomada de decisões informadas sobre o ciclo de vida do produto ou sistema analisado (EUROPEAN COMMISSION, 2010a).

3.5.1.4 Interpretação

A interpretação é a fase da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na qual os resultados das outras fases são interpretados de acordo com o objetivo do estudo, utilizando análises de sensibilidade e incerteza. O resultado da interpretação pode ser uma conclusão que serve como recomendação para os tomadores de decisão ou também pode levar à recomendação de uma nova iteração, e possivelmente revisando o escopo do estudo, a coleta de dados para o inventário ou a avaliação de impacto (HAUSCHILD M.; JESWIET, 2005).

De acordo com a ABNT NBR ISO 14040 (2025) e ABNT NBR ISO 14044 (2009), esta etapa do estudo deve conter as seguintes análises: identificação de questões significativas, verificação de completeza (ou completude), verificação de sensibilidade, verificação de consistência, conclusões, limitações e recomendações.

A identificação de questões significativas é o ponto de partida dessa etapa. Ela envolve a análise dos principais contribuintes para os impactos ambientais observados, como processos-chave, fluxos elementares e categorias de impacto relevantes. Esse diagnóstico utiliza técnicas como análise de contribuição ou análise de pontos fracos, que ajudam a quantificar a relevância de diferentes aspectos do sistema estudado. Além disso, escolhas metodológicas, como critérios de alocação e abordagens de modelagem, também são avaliadas quanto ao seu impacto nos resultados. Na sequência, os resultados são submetidos a verificações rigorosas para avaliar sua confiabilidade. A análise de completude verifica se todos os dados relevantes foram incluídos e se os critérios de corte definidos no escopo foram atendidos. Quando lacunas significativas são identificadas, elas podem exigir revisões no escopo ou até mesmo iterações no modelo de inventário. Já a análise de consistência avalia se os métodos, suposições e dados foram aplicados de forma uniforme ao longo do estudo, o que é essencial para garantir comparações válidas entre diferentes alternativas (EUROPEAN COMMISSION, 2010b).

Outro aspecto fundamental é a análise de sensibilidade, que examina como variações em parâmetros, dados ou escolhas metodológicas afetam os resultados finais. Essa análise fornece uma base para entender a robustez das conclusões e para identificar áreas em que a melhoria da qualidade dos dados ou a revisão de pressupostos poderia fortalecer o estudo. Para estudos comparativos, a sensibilidade das diferenças entre sistemas também é investigada, garantindo que quaisquer discrepâncias metodológicas ou qualitativas não comprometam a validade das conclusões (JOLLIET et al., 2016).

Por fim, a interpretação de resultados em uma ACV não se limita a relatar os achados,

mas também enfatiza a comunicação clara e precisa dos mesmos, destacando quaisquer limitações e prevenindo interpretações equivocadas. Essa abordagem sistemática garante que os resultados sejam confiáveis e relevantes, oferecendo uma base sólida para decisões orientadas à sustentabilidade ((JOLLIET et al., 2016).

3.6 Inventário de Gases de Efeito Estufa

A pauta climática vem recebendo atenção crescente nas últimas décadas. Em 1988, em Toronto – Canadá, ocorreu a primeira reunião entre líderes políticos e cientistas de diversos países para discutir as mudanças climáticas, da qual emergiu a proposta de criação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), oficialmente estabelecido em 1990, com o objetivo de alertar o mundo sobre o aquecimento global. Em 1995, a partir da constatação dos primeiros sinais das mudanças climáticas e de seus impactos, intensificaram-se as negociações internacionais que culminaram na assinatura, em 11 de dezembro de 1997, do Protocolo de Kyoto, durante a COP3, no Japão. Esse tratado representou o primeiro acordo internacional a estabelecer metas obrigatórias de redução de gases de efeito estufa para os países industrializados, estipulando, para o período de 2008 a 2012, a diminuição média de 5,2% das emissões em relação aos níveis de 1990. O Protocolo entrou em vigor 2005, após atingir o número necessário de ratificações para sua validade internacional. (AGÊNCIA SENADO, 2022).

De acordo com o PAINEL INTERGOVERNAMENTAL PARA A MUDANÇA DE CLIMA [IPCC] (2022), para limitar o aquecimento global a 2,0 °C ou menos, o mundo precisa atingir as emissões líquidas de CO₂ a zero por volta de 2070. Atingir um limite de 1,5 °C antecipa esta data para cerca de 2050.

O mais recente compromisso mundial para limitar o aumento da temperatura do planeta abaixo de 2 °C ocorreu em 2015 durante a COP-21 [21ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas], denominado Acordo de Paris, firmado por 195 países, que entrou em vigor em 4 de novembro de 2016 (WWF, 2022).

Segundo WRI Brasil (2021), o consumo de energia é de longe a maior fonte de emissões de GEE causadas por seres humanos, responsável por 73% das emissões mundiais. O setor de energia inclui transporte, eletricidade e geração de calor, edifícios, fabricação e construção, emissões fugitivas e outras queimas de combustível. Os outros principais emissores são: agropecuária (12%); uso da terra, mudança no uso da terra e silvicultura (6,5%); processos industriais de produtos químicos, cimento e outros (5,6%); e resíduos, incluindo aterros e águas residuais

(3,2%).

O movimento mundial em função das mudanças climáticas busca promover várias iniciativas públicas e privadas para reduções das emissões de carbono. A indústria do aço, por exemplo, é uma das grandes emissoras globais de GEE, e responde por cerca de 7% a 9% das emissões mundiais. Com o intuito de cumprir as metas estabelecidas no Acordo de Paris, membros da organização *Responsible Steel* – iniciativa global de certificação e padrão multisetorial da indústria do aço – firmaram parcerias para criação do *Steel Zero* – uma iniciativa para acelerar a transição da indústria do aço para emissões líquidas zero de carbono (RESPONSIBLE STEEL, 2022).

Neste contexto, em 1998, desenvolveu-se pelo *World Resources Institute* (WRI) nos Estados Unidos, a ferramenta *GHG Protocol*, utilizada para entender, quantificar e gerenciar os GEEs. Este método é hoje o mais usado mundialmente pelas empresas e governos para realização de inventários de GEE e é compatível com os métodos de quantificação do IPCC (FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS, 2023).

O inventário de GEE pode ser considerado a principal fonte de informação para tomada de decisão das organizações e do mundo no processo de descarbonização. Devido à necessidade latente de atender a demanda do mercado, com o objetivo de reduzir os impactos das ações humanas no planeta, o inventário de GEE direciona as iniciativas internas de uma organização e aufera visibilidade junto aos *stakeholders* (CARBON, 2022).

O *GHG Protocol* é uma metodologia que ajuda as empresas a contabilizar e reportar suas emissões de gases de efeito estufa. Para realizar um inventário de gases de efeito estufa, é importante primeiro definir quais fontes de emissão e quais gases serão incluídos no inventário. Depois, é necessário coletar dados relevantes para cada fonte de emissão e utilizar esses dados para calcular as emissões de gases de efeito estufa. É importante verificar os resultados para garantir que as emissões foram calculadas corretamente. Por fim, os resultados devem ser reportados de acordo com as diretrizes do *GHG Protocol* (GHG PROTOCOL BRASIL, 2022).

De acordo com o GHG PROTOCOL (2023), para registro público de emissões, as empresas membros ao programa devem registrar em sua lista de emissões todos os gases que são internacionalmente reconhecidos como gases do efeito estufa regulados pelo Tratado de Kyoto. Esses gases são:

- **Dióxido de carbono (CO₂):** emitido por atividades antrópicas, como o uso de combustíveis fósseis e desmatamentos. É utilizado como referência para classificar o poder de

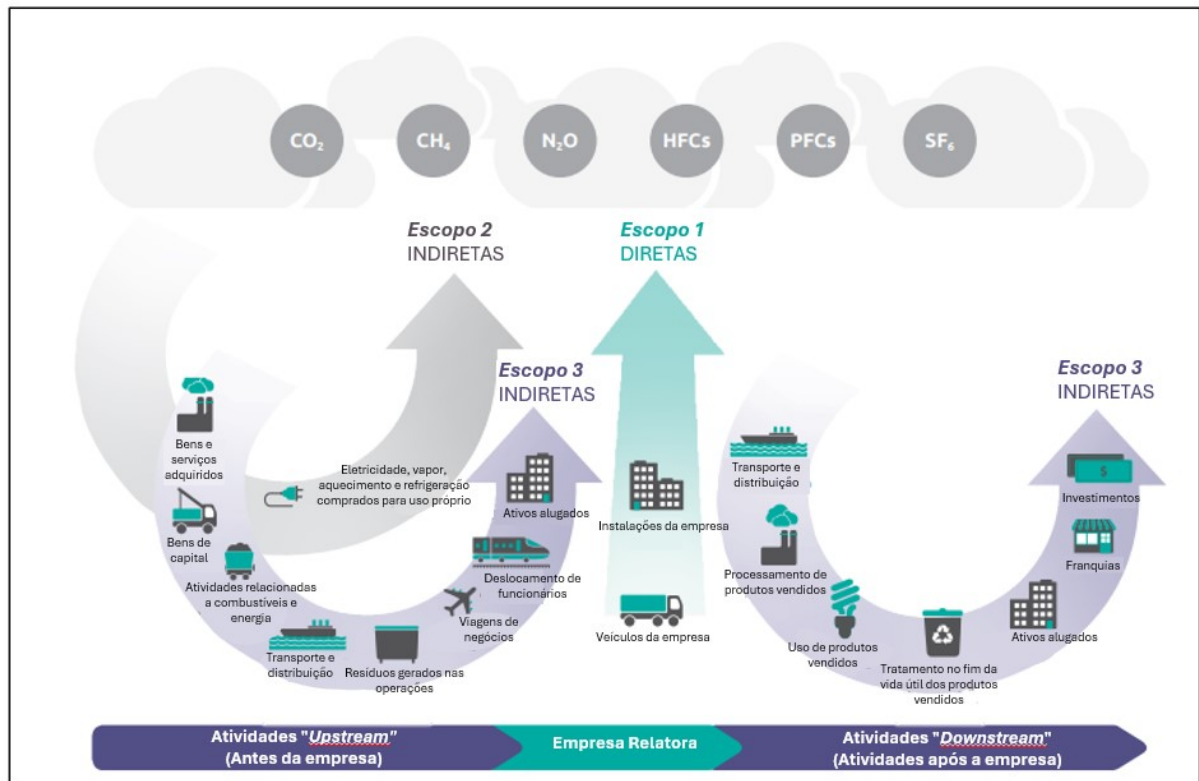
aquecimento global dos demais GEEs.

- **Metano (CH_4):** resultado da decomposição da matéria orgânica, encontrado em lixões, aterros sanitários e reservatórios de hidrelétricas. Seu poder de aquecimento global equivale a 28 vezes o do CO_2 .
- **Óxido nítrico (N_2O):** com um poder de aquecimento global 310 vezes maior que o do CO_2 , suas emissões provêm principalmente do setor agropecuário.
- **Hexafluoreto de enxofre (SF_6):** utilizado como isolante térmico, é o gás com maior potencial de aquecimento, sendo 23.900 vezes mais ativo que o CO_2 .
- **Hidrofluorcarbonos (HFCs) e Perfluorcarbonos (PFCs):** utilizados em aerossóis, refrigeradores e solventes, possuem alto potencial de aquecimento global.

Para calcular o impacto total das emissões, é necessário considerar o Potencial de Aquecimento Global (GWP, do inglês *Global Warming Potential*) de cada um desses gases. O GWP é uma métrica que compara o potencial de aquecimento de cada gás em relação ao dióxido de carbono (CO_2), que é utilizado como referência com GWP igual a 1. Por exemplo, o metano (CH_4) tem um GWP de aproximadamente 28 a 36 vezes maior do que o CO_2 . Portanto, ao calcular o dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_2\text{-e}$) para cada gás, multiplica-se as quantidades de emissões de cada gás pelo seu valor de GWP relativo ao CO_2 . Dessa forma, obtém-se uma métrica única que permite comparar o impacto climático total das emissões de gases de efeito estufa (GHG PROTOCOL, 2023).

Segundo a ABNT NBR ISO 14064 (2018), para fins de contabilização e elaboração do inventário de GEE, a metodologia *GHG Protocol* define três “escopos” (Escopo 1, Escopo 2 e Escopo 3), conforme apresentado na Figura 17. O Escopo 1 compreende as emissões diretas de GEEs originadas de fontes pertencentes ou controladas pela organização. Essas emissões surgem de diversas atividades, tais como a combustão de combustíveis em caldeiras, fornos e veículos da empresa, bem como das emissões geradas pela produção de químicos nos equipamentos de processos que pertencem ou estão sob controle da organização. Também são consideradas as emissões decorrentes dos sistemas de ar-condicionado e refrigeração utilizados.

Figura 17 – Emissões de GEE divididas por escopo e categorias de emissão conforme GHG Protocol



Fonte: GHG PROTOCOL (2023).

As emissões do Escopo 1 são subdivididas em cinco categorias principais (ABNT NBR ISO 14064, 2018)

1. **Combustão estacionária:** Emissões resultantes da geração de eletricidade, vapor, calor ou energia por meio de equipamentos fixos, como caldeiras, fornos, turbinas, incineradores, entre outros, em um local determinado.
2. **Combustão móvel:** Emissões provenientes do transporte em geral, incluindo a frota operacional da empresa, bem como veículos fora de estrada, utilizados em atividades como construção, agricultura e silvicultura.
3. **Emissões de processos físicos e químicos:** Emissões que não são oriundas da combustão, mas sim resultantes de processos físicos ou químicos, como a liberação de CO₂ durante a calcinação na fabricação de cimento, ou emissões de PFCs na fundição de alumínio.
4. **Emissões fugitivas:** Compreendem as liberações de GEEs oriundas da produção, processamento, transmissão, armazenagem e uso de combustíveis, bem como liberações não intencionais de substâncias que não passem por chaminés ou outras aberturas equivalentes,

como vazamentos de hexafluoreto de enxofre (SF_6) em equipamentos elétricos ou de hidrofluorcarbonos (HFCs) durante o uso de equipamentos de refrigeração e ar-condicionado, e vazamentos de metano (CH_4) no transporte de gás natural.

5. **Emissões agrícolas:** Essas incluem emissões resultantes da fermentação entérica (CH_4), manejo de esterco (CH_4 , N_2O), cultivo do arroz (CH_4), preparo do solo (CO_2 , CH_4 , N_2O), queima prescrita da vegetação nativa (CH_4 , N_2O) e queima de resíduos agrícolas (CH_4 , N_2O).

O Escopo 2 abrange as emissões indiretas de GEEs relacionadas à energia elétrica e térmica adquirida e consumida pela empresa. Essa energia adquirida pode ser comprada diretamente ou trazida para dentro dos limites da organização. As emissões de Escopo 2 são contabilizadas no local onde a energia é produzida, caso a produção ocorra fora dos limites da empresa. Essas emissões são consideradas indiretas porque ocorrem devido ao consumo de energia adquirida, não sendo geradas diretamente pelas instalações da empresa. Para muitas organizações, a energia adquirida é uma das principais fontes de emissões de GEEs e representa uma oportunidade significativa para reduzir a pegada de carbono. Ao contabilizar as emissões de Escopo 2, é possível avaliar oportunidades e riscos associados às mudanças nos custos da energia e nas emissões de GEEs (ABNT NBR ISO 14064, 2018).

O Escopo 3 é uma categoria de relatório opcional que abrange todas as outras emissões indiretas associadas às atividades da empresa. Essas emissões ocorrem em fontes que não pertencem ou não são controladas pela própria empresa. Algumas das atividades incluídas no Escopo 3 são a extração e produção de matérias-primas e outros materiais realizados por terceiros, mas que são utilizados nos processos da empresa que está elaborando o inventário; o transporte de colaboradores da empresa em meios de transporte não controlados pela mesma; e as emissões relacionadas ao uso final de bens de consumo vendidos pela empresa, entre outras. As emissões do escopo 3 são contabilizadas na categorias de emissão conforme apresentado na Figura 17 (ABNT NBR ISO 14064, 2018).

Ao final dos cálculos do inventário, as informações devem ser reunidas e sintetizadas em forma de inventário, contemplando o quantitativo de GEEs gerados pelas operações do empreendimento (ABNT NBR ISO 14064, 2018).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, que aplica a metodologia de ACV, foi acompanhado um teste piloto de caracterização do potencial energético de materiais carbonosos provenientes de resíduos de *shredder* (conhecidos como *fluff*), utilizados para a produção de gás de síntese. Por razões de segredo industrial, os detalhes específicos da tecnologia não serão discutidos neste trabalho.

Antes da etapa de gaseificação propriamente dita, o *fluff* passou por um processo de preparação em uma empresa especializada, no qual foi convertido em Combustível Derivado de Resíduo Industrial (CDRI). Essa fase envolveu operações de separação magnética, secagem, peneiramento e trituração, com o objetivo de adequar as características físicas do material às condições ideais para o processo termoquímico de gaseificação. Ressalta-se que essa etapa demandou o consumo de energia elétrica para o funcionamento dos equipamentos empregados nas atividades de preparação.

O gaseificador empregado é de porte semi-industrial, de leito fixo, concorrente, com fluxos de matéria-prima e gases igualmente descendentes. Diferentemente de sistemas convencionais que utilizam ar ambiente como agente de gaseificação — o que introduziria N_2 na corrente de gás —, neste caso foi empregada uma tecnologia inovadora que utiliza CO_2 como agente gaseificador, possibilitando reações de oxidação e redução que contribuem para a valorização energética do processo.

Esse equipamento, apresentado na Figura 18, foi originalmente projetado para processar biomassa como matéria-prima, incluindo madeira em forma de *chips*, cavacos ou materiais similares. Sua concepção tecnológica tem como finalidade a produção de gás de síntese para alimentação de grupos geradores, com configuração construtiva que favorece reações catalíticas de metanação, resultando em uma corrente gasosa mais próxima à composição do gás natural, o que facilita sua utilização direta em motogeradores. Neste estudo, a tecnologia foi adaptada para a gaseificação de resíduos de *fluff* provenientes de uma siderúrgica semi-integrada localizada no estado de São Paulo.

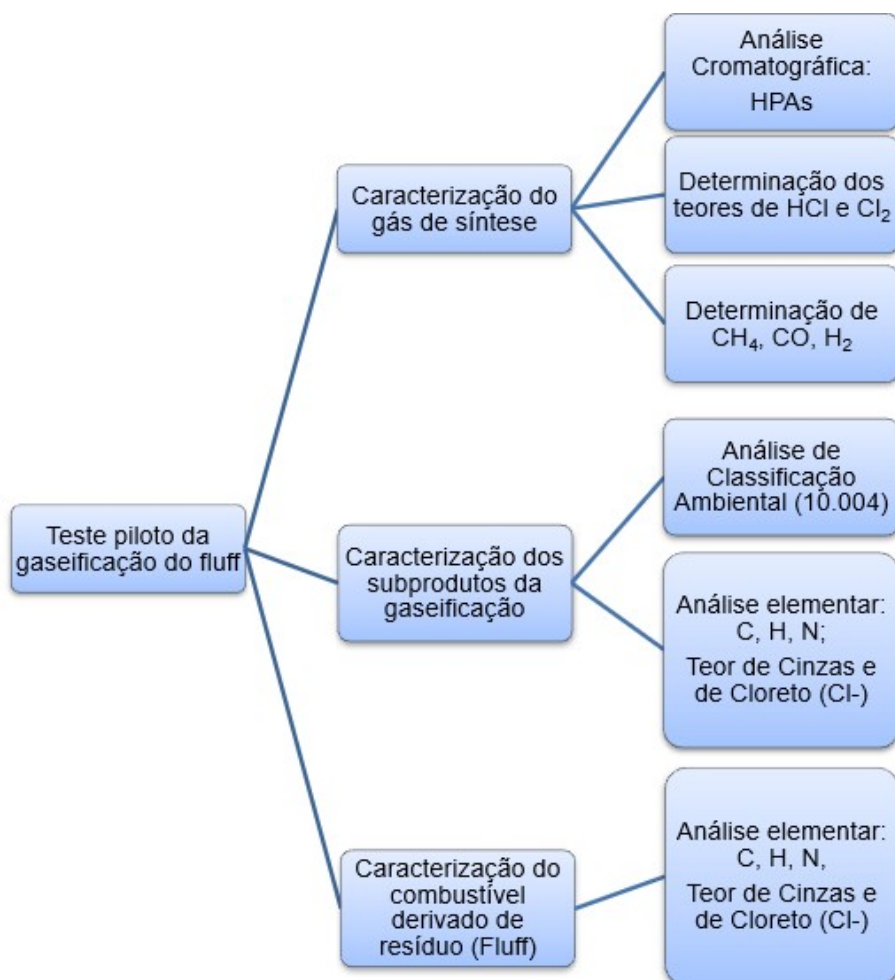
Figura 18 – Gaseificador semi-industrial utilizado para realização dos testes



Fonte: Registrado pela autora, 2025

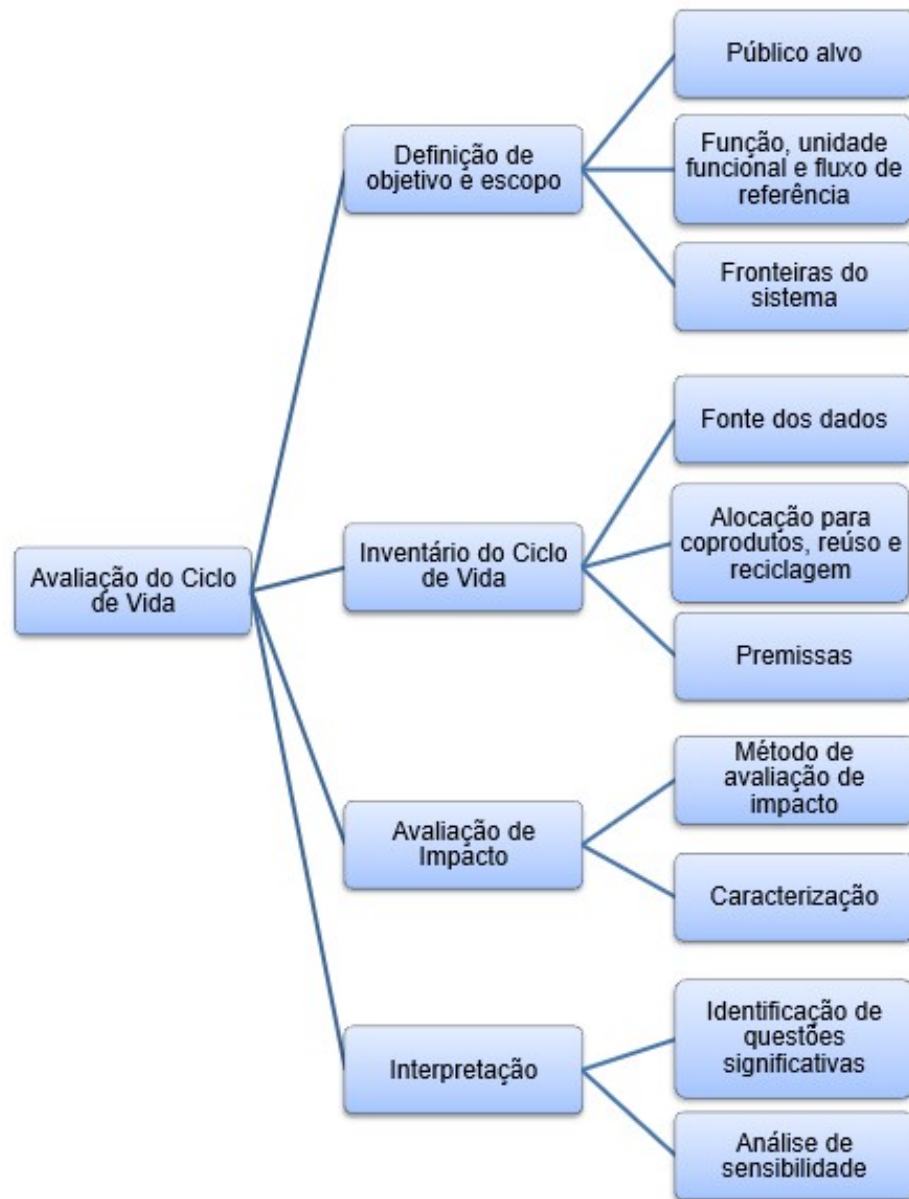
Foram conduzidos ensaios de caracterização físico-química, tanto do gás de síntese quanto dos subprodutos gerados pelo processo de gaseificação. Os resultados do teste piloto e das análises ambientais foram utilizados para desenvolver uma avaliação de viabilidade ambiental por meio da metodologia de ACV. Esta etapa teve como foco projetar os impactos potenciais da produção em larga escala e subsidiar o desenvolvimento de projetos com *design* voltado à circularidade. Além disso, foi realizada uma análise comparativa visando consumir o gás de síntese gerado pela gaseificação do *fluff* em substituição ao gás natural no processo de laminação na siderurgia. Com os dados obtidos na caracterização e na ACV, foi realizado o inventário de gases de efeito estufa (GEE) para analisar os resultados de emissão de CO₂ ao se consumir o gás de síntese em comparação ao gás natural. Esta análise teve como objetivo quantificar os benefícios associados à descarbonização e sustentar a tomada de decisões para a implantação em escala industrial.

Dessa forma, o estudo foi desenvolvido em três grandes etapas, sendo: teste piloto da gaseificação do *fluff*, análise do ciclo de vida e inventário de gases de efeito estufa, contendo as principais macroetapas descritas nos fluxogramas, conforme a Figura 19, Figura 20 e Figura 21.

Figura 19 – Etapa do Teste piloto da gaseificação do *fluff*

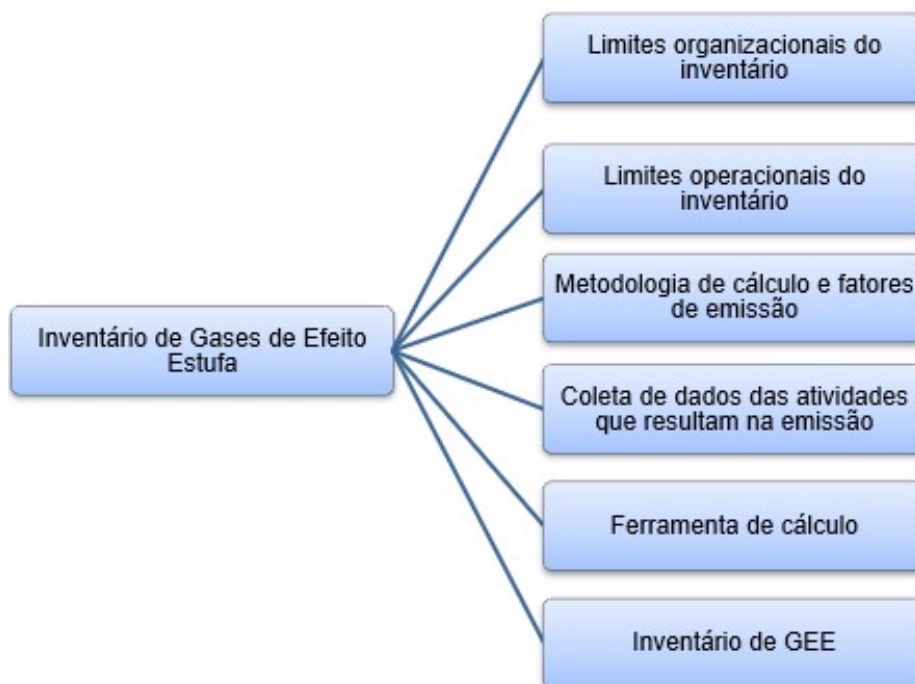
Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Figura 20 – Etapa da Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Figura 21 – Etapa do Inventário de Gases de Efeito Estufa



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

4.1 Teste piloto da caracterização da gaseificação do *fluff*

Para realizar a gaseificação dos resíduos de *fluff* em escala piloto, foram utilizados resíduos provenientes de uma *Shredder* localizada em São Paulo, cuja finalidade é a recepção e o beneficiamento de sucata para posterior utilização nas unidades siderúrgicas, como carga metálica.

Por meio da contratação de transportadora autorizada, foram recebidos 6.680 kg de *fluff* para preparação, dos quais uma fração foi efetivamente convertida em CDRI – Combustível Derivado de Resíduos Industriais – e utilizada nos testes. A preparação do *fluff* envolveu peneiramento, trituração, secagem e separação de materiais metálicos ferrosos e não ferrosos. O material resultante foi homogeneizado para garantir a comparabilidade dos testes realizados.

O processo de gaseificação em escala piloto foi conduzido pela empresa detentora da tecnologia, e iniciou-se com o uso de GLP para o aquecimento do reator até que se atingissem as condições necessárias de operação. A alimentação do *fluff* ocorreu pela parte superior do gaseificador e, a partir da ativação das reações termoquímicas, o sistema tornou-se autossuficiente, possibilitando a interrupção do uso de GLP e mantendo a geração contínua de gás de síntese. Além disso, o consumo de energia elétrica esteve presente ao longo de todo o processo, sendo

necessário para o acionamento das correias transportadoras responsáveis pela alimentação do material, bem como para o funcionamento de equipamentos acessórios de suporte à operação.

Os testes de gaseificação foram conduzidos ao longo de três dias, com o objetivo de monitorar o processo, compreender seu comportamento e identificar as condições operacionais ideais para subsidiar o desenvolvimento de um gaseificador em escala industrial. Durante os ensaios, foram utilizadas quantidades específicas de CDRI: 585 kg no dia 19/04/2024, 285 kg no dia 22/04/2024 e 262,5 kg no dia 24/04/2024. Ressalta-se que esses valores representam apenas uma parcela do total recebido, sendo o restante direcionado a descarte, conforme o tipo de resíduo.

Todos os ensaios foram realizados com a mesma amostra previamente homogeneizada de *fluff*, assegurando a uniformidade das condições de entrada. Durante os experimentos, foram coletadas e analisadas amostras representativas do material de entrada (CDRI), bem como das correntes de saída, incluindo o gás de síntese gerado e os resíduos sólidos. Além disso, visando validar a compatibilidade do gás de síntese com o gás natural, testes adicionais foram conduzidos em um motogerador originalmente projetado para operação com gás natural.

Cabe destacar que as condições operacionais detalhadas do processo não são apresentadas neste trabalho por se tratarem de informações sob sigilo de mercado da empresa responsável pela tecnologia. Assim, a atuação da pesquisa concentrou-se exclusivamente na análise dos dados gerados nas condições propostas, não havendo investigação técnica direta sobre o processo de gaseificação por parte da autora.

4.1.1 Caracterização do gás de síntese

A amostragem em chaminé envolve a coleta de um volume conhecido de gás, seguida de análise laboratorial para quantificar os poluentes presentes. Por meio de cálculos específicos, é possível determinar as emissões atmosféricas da fonte geradora. Esse procedimento foi realizado com o objetivo de avaliar as concentrações e taxas de emissão de Ácido Clorídrico (HCl), Cloro Livre (Cl₂) e Compostos Orgânicos Voláteis (COV) nos efluentes gasosos da unidade mencionada anteriormente.

As amostragens em chaminé foram realizadas utilizando os métodos estabelecidos pela CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, equivalentes às normas da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas e da USEPA (*United States Environmental Protection Agency*).

O ponto de coleta do gás de síntese foi localizado no duto de saída do gaseificador, após a lavagem dos gases com uma solução líquida contendo soda cáustica, utilizada para avaliar a necessidade de remoção dos efluentes gasosos de cloro gerados pelos resíduos plásticos presentes no *fluff*. Por este motivo, amostras para análise de Ácido Clorídrico (HCl) e Cloro Livre (Cl₂) também foram coletadas antes da etapa de lavagem dos gases.

Os métodos e normas aplicados para a determinação dos parâmetros de emissão na chaminé foram os seguintes:

- **CETESB L9.224:** Determinação da umidade dos efluentes (CETESB L9.224, 2021);
- **EPA 026:** *Determination of hydrogen halide and halogen emissions from stationary sources non-isokinetic* (Determinação de emissões de ácido clorídrico e halogênios a partir de fontes estacionárias não-isocinéticas)(EPA 026, 1998);
- **EPA 030:** *Volatile Organic Sampling Train* (Amostragem de compostos orgânicos voláteis)(EPA 030, 1999).

As amostras foram coletadas por empresa especializada, acondicionadas adequadamente, seguindo as recomendações específicas das normas de amostragem, e posteriormente enviadas para análise em laboratório especializado.

Além dessas análises, também foi realizado o monitoramento instantâneo no gás de síntese dos gases: CO₂, CO e CH₄, por meio do Analisador de Gás *Super Systems PGA 3500* - calibrado em 15/01/2019, utilizando padrão para calibração "*Span*" e gás de mistura padrão para calibração "*Zero*".

4.1.2 Caracterização do CDRI e dos subprodutos da gaseificação

Durante a etapa de gaseificação foram gerados subprodutos, como cinzas e gases condensáveis (resíduos oleosos). A coleta das amostras em todas as fases do processo experimental, bem como o registro dos volumes gerados, foi realizada pela empresa responsável pela execução dos testes no gaseificador. Em seguida, cada tipo de subproduto passou por um processo de homogeneização conduzido pela mesma equipe, a fim de garantir a representatividade da fração analisada. As amostras homogeneizadas foram então encaminhadas a um laboratório especializado, onde foram submetidas a diferentes análises químicas.

O mesmo procedimento de coleta e homogeneização foi aplicado para compor uma amostra representativa do CDRI (produto de entrada), que também foi enviada para análise.

As análises realizadas incluíram a determinação dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, cloreto e cinzas. Apenas o resíduo sólido das cinzas geradas após a gaseificação foi analisado de acordo com a norma ABNT NBR 10004:2024, com o objetivo de classificar o resíduo quanto à periculosidade (Classe I – Perigoso ou Classe II – Não Perigoso, com subdivisões II-A e II-B), considerando suas características físicas, químicas e biológicas (ABNT NBR ISO 10004, 2024).

A Tabela 2 apresenta um resumo dos métodos utilizados para cada parâmetro.

Tabela 2 – Métodos analíticos aplicados às amostras de CDRI e subprodutos da gaseificação

Parâmetro avaliado	Método de análise	Tipo de amostra
Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio	ASTM D5373-21	CDRI e resíduos oleosos
Cinzas	ASTM E1755-01(20)	Cinzas (resíduo sólido)
Cloreto	DIN 51727-11 e ASTM D4327-17	CDRI
Enxofre	ASTM D4239-18e1	CDRI e cinzas
Classificação do resíduo	ABNT NBR 10004:2024	Cinzas (resíduo sólido)

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

4.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi conduzida com base nas diretrizes estabelecidas pelas normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT NBR ISO 14044:2009, que estabelecem os princípios, estrutura, requisitos e diretrizes para a condução de estudos de ACV. A modelagem foi realizada no *software* SimaPro, versão 9.6.0.1, utilizando o método de avaliação de impactos ReCiPe 2016 (*Midpoint/H*), com sistema de alocação do tipo *cut-off*, em conformidade com o modelo de base *Ecoinvent* 3.10.

4.2.1 Objetivo e escopo do estudo

O objetivo deste estudo foi avaliar os impactos ambientais associados à substituição do gás natural por gás de síntese, gerado a partir da gaseificação de resíduos sólidos provenientes do beneficiamento de sucata (*fluff*), no processo de reaquecimento de tarugos em uma usina siderúrgica brasileira. Os resultados obtidos visam subsidiar decisões quanto à viabilidade ambiental da implantação de um sistema de gaseificação em escala industrial, fornecendo embasamento técnico para aprovação de investimentos.

A ACV foi estruturada de forma comparativa, contemplando três cenários distintos:

- **Cenário 1 – Produção e uso de gás de síntese:** produção de gás de síntese por meio da gaseificação do *fluff* e seu consumo direto em fornos de reaquecimento de tarugos.
- **Cenário 2 – Produção e uso de gás natural (*status quo*):** extração, processamento e consumo de gás natural na mesma aplicação industrial.
- **Cenário 3 – Disposição do *fluff* em aterro sanitário:** destinação do *fluff* ao aterro sanitário, com análise dos impactos evitados no caso de sua valorização energética.

4.2.1.1 Função, unidade funcional e fluxo de referência

A função do sistema estudado é fornecer energia térmica ao forno de reaquecimento de tarugos em uma planta siderúrgica. Para representar quantitativamente essa função, adotou-se como unidade funcional a geração de 1 MJ de energia térmica útil (base PCI), fornecida ao forno industrial. Essa escolha permite a comparação equitativa entre os cenários avaliados, independentemente do tipo de combustível utilizado.

Para assegurar a comparabilidade entre os diferentes vetores energéticos, foi necessário determinar a quantidade de combustível requerida para a entrega de 1 MJ de energia térmica útil, definindo assim o fluxo de referência da ACV.

O cálculo foi realizado com base no poder calorífico inferior (PCI) dos combustíveis, expresso em MJ/Nm³, e na vazão volumétrica por unidade de energia fornecida. A quantidade de combustível necessária para a geração de 1 MJ de energia térmica (*V*, em Nm³) foi obtida pela seguinte equação:

$$V = \frac{1}{PCI} \quad (1)$$

Em que:

- *PCI* é o poder calorífico inferior do combustível, em MJ/Nm³;
- *V* é o volume de combustível necessário para fornecer 1 MJ de energia térmica útil.

Para o gás natural, adotou-se um $PCI_{GN} = 35,92 \text{ MJ/Nm}^3$, valor padrão obtido da unidade siderúrgica estudada.

Para o gás de síntese produzido a partir do *fluff*, o valor do PCI foi calculado com base na composição média volumétrica do gás obtido nos testes experimentais, considerando os principais constituintes combustíveis. O PCI do gás de síntese foi determinado a partir da seguinte equação:

$$PCI_{G_{desntese}} = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot PCI_i) \quad (2)$$

Em que:

- x_i é a fração volumétrica do componente i no gás de síntese;
- PCI_i é o poder calorífico inferior do componente i , em MJ/Nm³;
- n é o número total de componentes combustíveis relevantes.

Foram considerados os seguintes componentes: monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) e compostos orgânicos voláteis (VOC). Os demais constituintes do gás, como dióxido de carbono (CO₂) e oxigênio (O₂), não possuem valor energético e, portanto, não contribuem para o PCI total. O valor do PCI_{Syngas} foi adotado como base para a modelagem do cenário com gás de síntese, servindo de base para o cálculo do fluxo elementar.

Para o cenário de disposição em aterro (Cenário 3), a unidade funcional adotada foi 1 quilograma de *fluff*. Essa abordagem possibilita avaliar os impactos evitados ao alterar a rota de destinação do *fluff* de aterro para valorização energética. Cabe destacar que os impactos evitados neste cenário não foram incluídos na comparação direta entre os Cenários 1 e 2, visto que a unidade funcional adotada é distinta. No entanto, os benefícios ambientais identificados podem ser relevantes em estudos complementares, como ACV de veículos automotivos, permitindo, por exemplo, a exclusão da etapa de fim de vida do *fluff* (disposição em aterro) ao se considerar a adoção de rotas alternativas de recuperação energética.

4.2.1.2 Fronteiras do sistema

As fronteiras do sistema foram definidas de acordo com o objetivo comparativo do estudo e as diretrizes estabelecidas pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, com foco nos processos diretamente relacionados à geração e ao uso da energia térmica no forno de reaquecimento de tarugos.

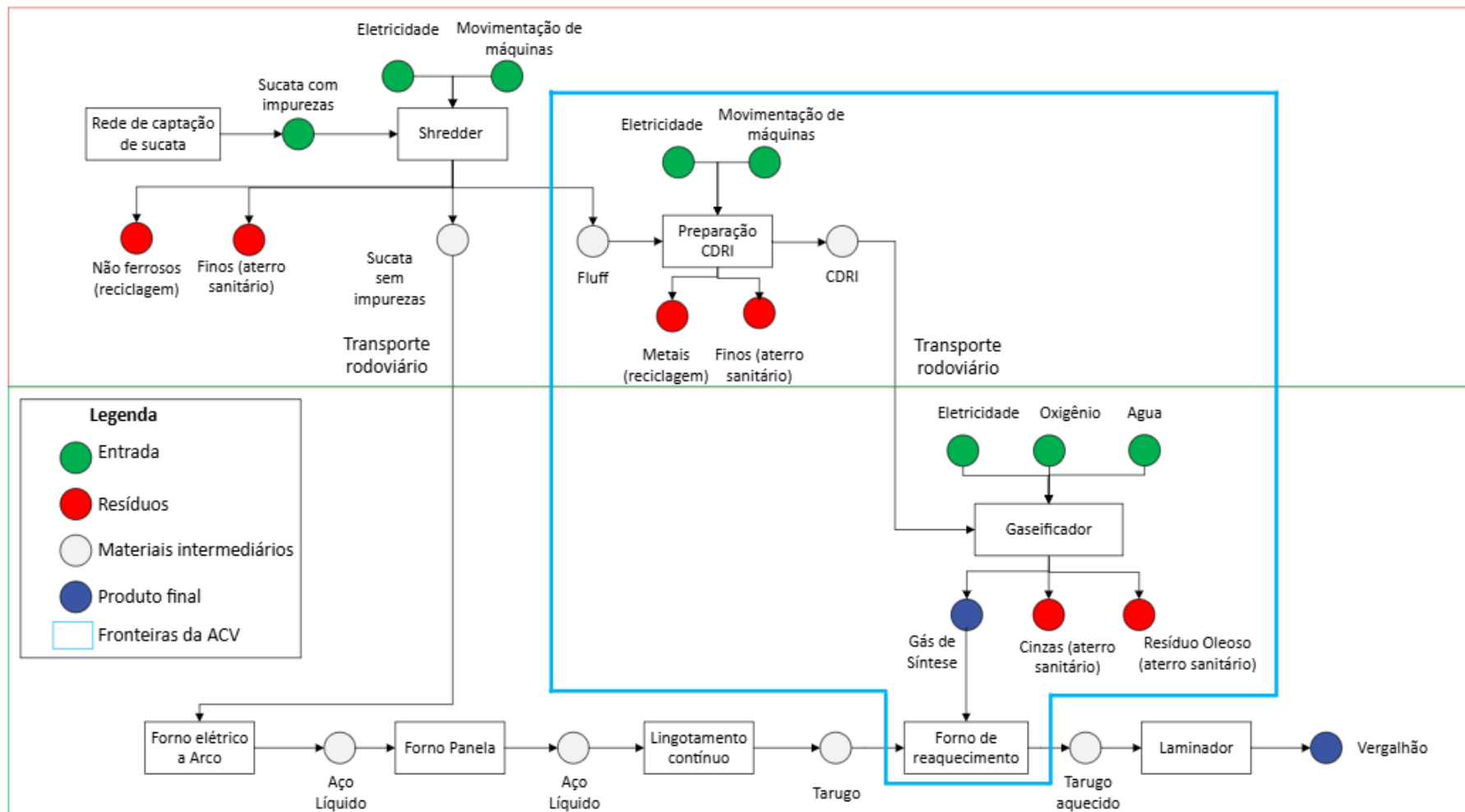
Para cada cenário avaliado, as fronteiras do sistema foram delineadas conforme descrito a seguir:

- **Cenário 1 – Produção e uso de gás de síntese:** Conforme apresentado na Figura 22 as fronteiras iniciam-se com a geração do *fluff* proveniente do processamento da sucata metálica, abrangendo as etapas de preparação do CDRI, transporte até a planta de

gaseificação, processo de gaseificação, emissões atmosféricas e tratamento dos resíduos sólidos. Inclui-se também o consumo do gás de síntese no forno de reaquecimento.

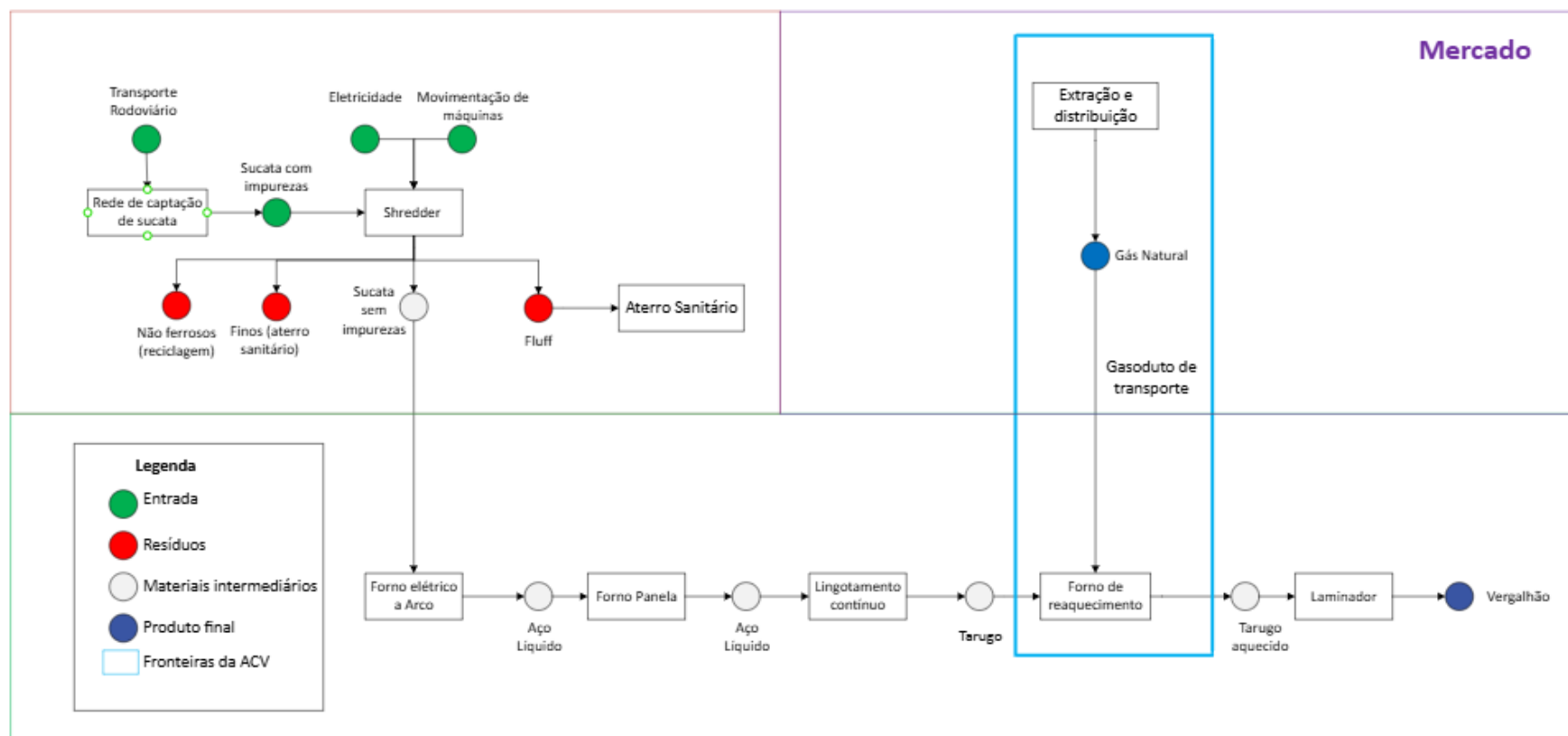
- **Cenário 2 – Produção e uso de gás natural:** Conforme apresentado na Figura 23 as fronteiras do sistema abrangem a extração, o processamento e a distribuição do gás natural, com seu uso final no forno de reaquecimento de aço bruto conhecido como tarugo, na unidade siderúrgica. A geração do gás ocorre no mercado (fora dos limites geográficos da usina), e os processos anteriores à entrega do gás via gasoduto também estão incluídos.
- **Cenário 3 – Disposição do *fluff* em aterro sanitário:** Conforme apresentado na Figura 24 este cenário considera a geração do *fluff* como resíduo do processo de beneficiamento da sucata, seguido de seu transporte e disposição final em aterro sanitário, sem qualquer forma de aproveitamento energético ou captura de biogás.

Figura 22 – Fronteiras do sistema – Cenário 1: Produção e uso de gás de síntese



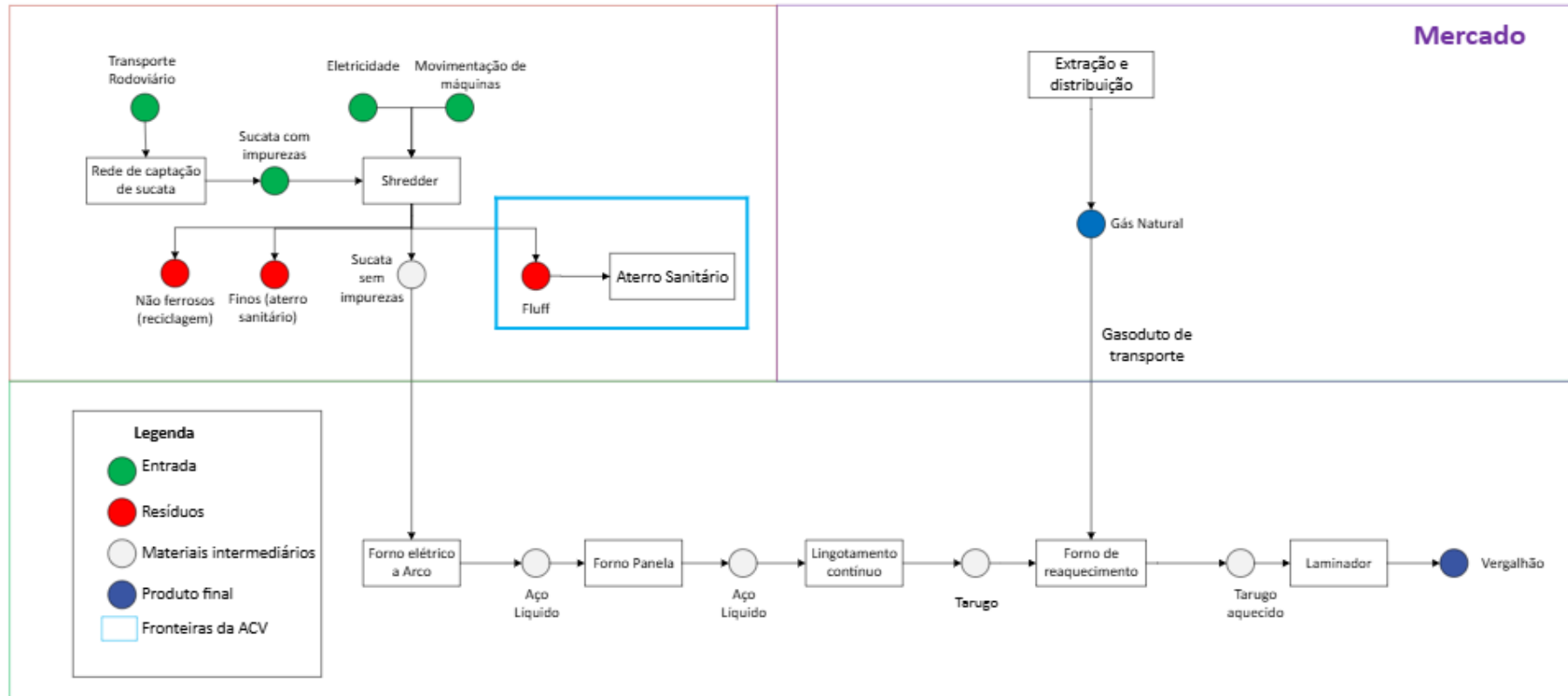
Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Figura 23 – Fronteiras do sistema – Cenário 2: Produção e uso de gás natural



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Figura 24 – Fronteiras do sistema – Cenário 3: Disposição do *fluff* em aterro sanitário



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

4.2.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

O inventário de ciclo de vida foi construído com base em dados primários obtidos em testes piloto, dados secundários da literatura e da base *Ecoinvent* 3.10.

Cenário 1 – Produção e uso de gás de síntese: a modelagem tem início a partir do *fluff*, considerado isento de carga ambiental, uma vez que os impactos de sua geração já foram atribuídos ao sistema de reciclagem de aço. O *fluff* é submetido a etapas de pré-tratamento para produção de combustível derivado de resíduo industrial (CDRI), incluindo peneiramento, secagem e separação metálica. As frações metálicas não ferrosas são destinadas à reciclagem, enquanto a fração de solo é enviada a aterro sanitário. A etapa subsequente de gaseificação consome oxigênio e eletricidade, além de gerar resíduos sólidos (cinzas) e emissões atmosféricas diretas.

Para calcular o fator de emissão de CO₂ por MJ de gás de síntese utilizado no forno, foi primeiramente determinado o conteúdo total de carbono no gás por metro cúbico normal (Nm³), somando-se as contribuições individuais de cada componente conforme sua fração volumétrica e número de átomos de carbono por molécula. A partir disso, foi utilizado o volume molar de um gás ideal a 1 atm e 25°C (22,414 L/mol) para converter o volume em quantidade de substância, e posteriormente a massa molar do carbono e do dióxido de carbono para obter a emissão correspondente. O cálculo pode ser representado pelas seguintes equações:

$$\text{mol de C por Nm}^3 = \frac{m_C}{M_C} = \frac{\text{massa de C (g/Nm}^3\text{)}}{12,011} \quad (3)$$

$$\text{kg de CO}_2/\text{Nm}^3 = \left(\frac{m_C}{M_C} \right) \cdot M_{CO_2} = \left(\frac{m_C}{12,011} \right) \cdot 44,01 \quad (4)$$

$$\text{kg de CO}_2/\text{MJ} = \frac{\text{kg de CO}_2/\text{Nm}^3}{PCI_{\text{Syngas}}} \quad (5)$$

Em que:

- m_C é a massa total de carbono no gás de síntese (g/Nm³), obtida experimentalmente como 0,5411 g/Nm³;
- M_C é a massa molar do carbono (12,011 g/mol);
- M_{CO_2} é a massa molar do dióxido de carbono (44,01 g/mol);

- PCI_{Syngas} é o poder calorífico inferior do gás, determinado em 28,79 MJ/Nm³.

Para estimar a proporção de carbono biogênico e fóssil no gás de síntese, foi utilizada a composição gravimétrica do *fluff*, com base em amostras analisadas. Cada fração (plásticos, borracha, madeira, papel, tecidos etc.) foi associada a um teor de carbono total do *fluff* à sua origem (biogênica ou fóssil), conforme dados da literatura (PAINEL INTERGOVERNAMENTAL PARA A MUDANÇA DE CLIMA [IPCC], 2022). Na Tabela 3 são apresentados os tipos de materiais que compõem o *fluff* e a distribuição percentual de carbono por origem.

Tabela 3 – Composição do *fluff* e distribuição do carbono por origem

Composição e origem do carbono no <i>fluff</i>				
Material	Proporção	% C total	C fóssil (%)	C biogênico (%)
Plásticos	29%	75%	100%	0%
Borracha	11%	56%	20%	36%
Têxteis	3%	40%	20%	20%
Madeira	7%	43%	0%	100%
Papel	1%	41%	1%	40%
Minerais, metais, solo e outros	49%	0%	0%	0%
Total estimado	—	—	48%	12%

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Com base nesses dados, com a caracterização dos gás de síntese e com os fluxos de entrada e saída medidos no teste piloto em planta piloto, os balanços de massa da modelagem deste cenário foram ajustados para a unidade funcional do estudo (1 MJ de energia térmica útil) considerando os volumes determinados no fluxo de referência. Dessa forma, o inventário do cenário 1 foi modelado conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Resumo dos fluxos modelados para o cenário de gás de síntese

Etapas de preparação do CDRI e gaseificação		
Descrição	Fluxo	Quantidade (por MJ)
Etapa de preparação do CDRI		
Entrada de <i>fluff</i>	Material	1 kg
Eletricidade	Consumo	0,03462 kWh
Produção de CDRI	Produto	0,61951 kg
Água evaporada	Emissão para o ar	0,1134 kg
Finos (terra)	Resíduo para aterro	0,1855 kg
Metais não ferrosos	Coproduto reciclável	0,10928 kg
Transporte de finos	Transporte	0,03865 kg.km
Etapa de gaseificação e uso do gás		
CDRI	Insumo	0,034 kg
Eletricidade	Consumo	0,01027 kWh
Oxigênio	Insumo	0,01553 kg
Gás de síntese gerado	Produto energético	1 MJ (0,03479 Nm ³)
Cinzas	Resíduo para aterro	0,00596 kg
Transporte de cinzas	Transporte	0,00124 kg.km
Transporte do CDRI	Transporte	0,00503 kg.km
CO ₂ fóssil	Emissão para o ar	0,0551 kg
CO ₂ biogênico	Emissão para o ar	0,0138 kg
HCl	Emissão para o ar	0,00014591 kg
Cl ₂	Emissão para o ar	0,00010816 kg

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Cenário 2 – Produção e uso de gás natural: O fornecimento de gás natural foi modelado com base em dados secundários da base *Ecoinvent* 3.10. O *dataset* selecionado corresponde ao processo “*natural gas, burned in boiler condensing modulating < 100kW, RoW*” (UUID: 337084c0-52e0-5494-9c40-36fd084c4d44), representativo da média do fornecimento global (*Rest-of-World*). Este inventário contempla as etapas de extração, beneficiamento, transporte por gasoduto de alta pressão e a combustão de 1 MJ.

As emissões atmosféricas consideradas incluem óxidos de nitrogênio (NO_x) e monóxido de carbono (CO), derivadas de medições em condições controladas, sem ajuste para a operação em larga escala devido à indisponibilidade de informações mais específicas. Outros poluentes

foram estimados a partir de referências secundárias disponíveis.

O fluxo de referência foi definido como a quantidade de gás natural necessária para gerar 1 MJ de energia térmica, equivalente a aproximadamente $0,02784 \text{ Nm}^3$, considerando o poder calorífico inferior (PCI) padrão de $35,92 \text{ MJ/Nm}^3$.

Cenário 3 – Disposição do *fluff* em aterro sanitário: O inventário de ciclo de vida deste cenário foi modelado considerando a disposição final de 1 kg de *fluff* em aterro sanitário, permitindo avaliar os impactos ambientais evitados ao se adotar a rota de recuperação energética como alternativa à disposição convencional.

Com base na composição gravimétrica do *fluff*, apresentada na Tabela 3, cada fração foi proporcionalmente alocada a conjuntos de dados específicos da base *Ecoinvent* 3.10, representando rotas de disposição final compatíveis com as características dos materiais. Essa abordagem visa refletir o comportamento diferencial de cada componente no processo de aterramento.

Por exemplo, os metais foram vinculados a processos de disposição de sucata metálica não reciclada; os materiais minerais (como pedras e fragmentos de solo) foram alocados a aterros de resíduos inertes; os resíduos orgânicos secos (como papel e madeira) foram associados a aterros convencionais de resíduos sólidos urbanos; e as frações plásticas e de borracha foram conectadas a rotas de disposição em aterros industriais. Todos os fluxos de disposição consideram ausência de recuperação energética ou aproveitamento de biogás.

O transporte até o local de disposição foi incluído na modelagem, com base em uma distância média de 45 km percorrida por caminhão de grande porte, utilizando a massa específica estimada dos resíduos como fator de conversão para o cálculo da carga transportada.

4.2.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) foi conduzida utilizando o *software* SimaPro, com posterior tratamento gráfico dos resultados no Microsoft Excel. Os fluxos elementares de entrada e saída obtidos na fase de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) foram normalizados pela unidade funcional definida para cada cenário, assegurando a comparabilidade entre os resultados obtidos.

Para a caracterização dos impactos ambientais, foi adotado o método *ReCiPe 2016 Midpoint (H)*, pertencente à categoria de métodos de nível *midpoint*, que traduzem os fluxos de inventário em indicadores de impacto com base em modelos de causa-efeito.

A versão *Midpoint (H)* do ReCiPe 2016 contempla um total de 18 categorias de impacto

ambiental, agrupadas em três áreas de proteção: saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos. Essas categorias, suas unidades e respectivas áreas de proteção estão organizadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Categorias de impacto ambiental consideradas no método ReCiPe 2016 Midpoint (H)

Categoria de impacto	Unidade	Área de proteção
Mudança do clima	kg CO ₂ -eq	Saúde humana e ecossistemas
Depleção da camada de ozônio estratosférico	kg CFC-11-eq	Saúde humana
Radiação ionizante	kBq eq U-235	Saúde humana
Formação de ozônio fotoquímico (saúde)	kg C ₂ H ₄ -eq	Saúde humana
Formação de ozônio fotoquímico (ecossistemas)	kg C ₂ H ₄ -eq	Ecossistemas
Formação de material particulado fino	kg PM _{2,5} -eq	Saúde humana
Acidificação terrestre	mol H ⁺ -eq	Ecossistemas
Eutrofização em água doce	kg P-eq	Ecossistemas
Eutrofização marinha	kg N-eq	Ecossistemas
Ecotoxicidade terrestre	CTUe	Ecossistemas
Ecotoxicidade em água doce	CTUe	Ecossistemas
Ecotoxicidade marinha	CTUe	Ecossistemas
Toxicidade humana cancerígena	CTUh	Saúde humana
Toxicidade humana não cancerígena	CTUh	Saúde humana
Uso do solo (déficit de carbono orgânico)	SOM deficit	Ecossistemas
Escassez de recursos minerais	kg Sb-eq	Recursos
Escassez de recursos fósseis	MJ	Recursos
Consumo de água doce	m ³ -eq	Recursos

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A conversão dos fluxos de inventário em resultados de impacto é realizada por meio da aplicação de fatores de caracterização, que expressam a contribuição relativa de uma substância a uma determinada categoria de impacto. Esses fatores são coeficientes definidos por especialistas, com base em modelos ambientais consolidados, e estão incluídos no próprio método ReCiPe 2016.

4.2.4 Interpretação dos resultados

A etapa de interpretação dos resultados consiste na identificação, qualificação e avaliação dos principais resultados obtidos na avaliação de impacto do ciclo de vida. O objetivo é contextualizar os impactos ambientais identificados, avaliar a confiabilidade dos dados utilizados,

discutir as principais contribuições dos processos modelados e identificar pontos críticos ou oportunidades de melhoria no sistema analisado, conforme estabelecido pela ISO 14044.

Com base nos impactos caracterizados para as categorias selecionadas, foi possível identificar as principais fontes de contribuição dentro de cada cenário, permitindo uma análise comparativa entre o uso do gás natural e do gás de síntese proveniente da gaseificação do *fluff*. As diferenças observadas foram interpretadas à luz da origem das emissões e consumos de recursos, destacando o papel do aproveitamento energético de resíduos como estratégia de redução de impactos em categorias como mudanças climáticas, escassez de recursos fósseis e toxicidade.

Para verificar a robustez dos resultados e a influência de escolhas metodológicas, foi realizada uma análise de sensibilidade. Essa análise não consistiu na mudança do método de avaliação de impacto ambiental adotado, mas na substituição da fonte de eletricidade utilizada na produção de oxigênio empregado na gaseificação do *fluff*. Foram comparados dois cenários: um utilizando eletricidade convencional (com mix energético nacional) e outro utilizando eletricidade 100% renovável (proveniente de parque eólico da própria empresa).

As demais variáveis do sistema não puderam ser alteradas na análise de sensibilidade por se tratarem de parâmetros fixos do processo experimental conduzido na planta-piloto, como a composição do *fluff*, a eficiência do reator e o consumo de insumos no processo de gaseificação. Assim, a análise se concentrou na variável mais representativa que poderia ser controlada no contexto da aplicação real da tecnologia.

4.2.5 Avaliação da qualidade dos dados

A qualidade dos dados utilizados na modelagem do inventário foi avaliada de forma qualitativa, com base na metodologia da matriz de *pedigree* proposta por Weidema e Wesnæs (1996) (WEIDEMA; WESNAES, 1996).

A matriz de *pedigree* classifica os dados a partir de cinco critérios principais: **(i)** confiabilidade da fonte (confiança); **(ii)** representatividade do mercado ou processo modelado; **(iii)** correlação temporal (diferença entre o ano do dado e o ano de referência do estudo); **(iv)** correlação geográfica (compatibilidade entre a região de origem do dado e a região do estudo); e **(v)** correlação técnica (adequação tecnológica entre os dados e os processos modelados).

Cada critério recebe uma pontuação de 1 a 5, sendo 1 atribuído a dados de alta qualidade (ex: medições diretas, atualidade e localização precisa) e 5 a dados de baixa qualidade (ex: estimativas genéricas, dados antigos ou de outra tecnologia). A descrição detalhada da matriz é

apresentada no Quadro 5.

O somatório das pontuações obtidas nos cinco critérios resulta em uma classificação qualitativa da qualidade geral do conjunto de dados, conforme a escala:

- **Alta qualidade:** somatório entre 5 e 11 pontos.
- **Qualidade média:** somatório entre 12 e 18 pontos.
- **Baixa qualidade:** somatório entre 19 e 25 pontos.

Esse método permitiu avaliar separadamente os dados de cada cenário modelado, atribuindo uma nota final por conjunto de dados, o que contribui para a transparência e a robustez da análise comparativa.

Quadro 5 – Descrição da matriz de pedigree para avaliação qualitativa de dados de ACV

Critério	Descrição	Escala de qualidade (1 = alta, 5 = baixa)
Confiabilidade	Grau de veracidade da fonte dos dados, com base em medições diretas, cálculos ou estimativas.	1 – Medição direta; 2 – Cálculo baseado em dados confiáveis; 3 – Estimativa com base em literatura; 4 – Suposição informada; 5 – Suposição arbitrária
Representatividade temporal	Atualidade dos dados em relação ao ano de referência do estudo.	1 – Mesmo ano; 2 – 1 a 3 anos antes; 3 – 4 a 10 anos; 4 – Mais de 10 anos; 5 – Ano desconhecido
Representatividade geográfica	Compatibilidade entre a origem dos dados e a região do estudo.	1 – Dados locais; 2 – Mesma região geográfica; 3 – País vizinho; 4 – Continente diferente; 5 – Localização desconhecida
Representatividade tecnológica	Semelhança entre o processo modelado e o processo real da base de dados.	1 – Tecnologia idêntica; 2 – Semelhante; 3 – Genérica; 4 – Diferente; 5 – Tecnologia desconhecida
Compleitude	Grau de cobertura dos fluxos relevantes no inventário.	1 – Totalmente documentado; 2 – Pequenos fluxos ausentes; 3 – Fluxos intermediários ausentes; 4 – Fluxos principais ausentes; 5 – Múltiplos dados ausentes

Fonte: Adaptado de Weidema et al. (1996).

4.3 Inventário de Gases de Efeito Estufa dos Cenários Avaliados

Foram elaborados dois inventários de GEE para a unidade siderúrgica do estudo. O primeiro inventário considera a substituição parcial do gás natural por gás de síntese produzido a

partir do *fluff*. O segundo inventário representa a situação atual da planta, com consumo integral de gás natural e envio do *fluff* para aterro sanitário.

Os limites organizacionais do inventário adotam a abordagem de controle operacional, considerando todas as emissões das atividades sob responsabilidade direta da unidade siderúrgica analisada.

Os limites operacionais do inventário englobam as emissões dos escopos 1, 2 e 3, conforme definidos pelo GHG Protocol: emissões diretas provenientes da combustão de combustíveis (escopo 1), emissões indiretas pelo uso de eletricidade adquirida (escopo 2) e outras emissões indiretas significativas, como o transporte de resíduos e matérias-primas (escopo 3).

A quantificação das emissões foi realizada por meio da ferramenta oficial da Fundação Getúlio Vargas (FGV), desenvolvida com base nas diretrizes do *GHG Protocol*. A metodologia de cálculo e os fatores de emissão utilizados seguem os parâmetros definidos pela ferramenta da FGV, complementados por dados de ACV nos casos específicos de disposição em aterro e uso de gás de síntese.

Os dados coletados abrangem desde o consumo de insumos e fontes energéticas até a produção anual de aço, além da inclusão de fatores de emissão apropriados para cada categoria de fonte. A coleta de dados incluiu informações primárias da planta, como o consumo anual de gás natural, produção de *fluff*, dados da *shredder* e do forno de laminação, além de estimativas de geração de gás de síntese.

No cenário com uso de gás natural, além das emissões diretas e indiretas associadas ao combustível fóssil, foi incorporada a emissão correspondente ao envio do *fluff* para aterro. O fator de emissão utilizado para esta etapa foi obtido a partir da modelagem da ACV, considerando exclusivamente os impactos do processo de disposição final em aterro (desconsiderando o transporte). Essa emissão foi alocada na categoria de tratamento de resíduos do escopo 3.

Já no cenário com uso de gás de síntese, foi considerado o fator de emissão do gás de síntese conforme detalhado na Seção 4.2.2. A estimativa da quantidade de gás gerado partiu da massa de *fluff* disponível atualmente na planta, baseada na produção anual da *shredder*, que gera aproximadamente 20.162.630,00 kg de *fluff* — considerando o volume já convertido a CDRI.

Esse volume de *fluff* permitiria a geração de cerca de 20.621.553,74 m³ de gás de síntese, assumindo um poder calorífico inferior (PCI) de 28,79 MJ/Nm³ para o gás, conforme calculado na Seção 4.2.2. Considerando que o PCI do gás natural utilizado na unidade é de 35,92 MJ/Nm³, estima-se que 1 m³ de gás de síntese substitui energeticamente 0,8 m³ de gás natural.

Com base no consumo anual de 23.043.706,95 m³ de gás natural no forno de laminação em

2024, o cenário com substituição permitiria suprir essa demanda por meio de 16.525.821,25 m³ de gás de síntese e 6.517.885,70 m³ de gás natural complementares. Assim, esse cenário não considera emissões associadas ao envio de *fluff* para aterro, uma vez que sua utilização é convertida integralmente em energia. Os resultados dos dois inventários foram expressos em toneladas de CO₂, discriminados por escopo (1, 2 e 3).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do estudo estão divididos nas etapas seguintes:

1. Teste Piloto da Gaseificação do *Fluff* com os resultados da caracterização dos produtos e subprodutos do processo;
2. Análise do Ciclo de Vida dos 3 cenários avaliados;
3. Inventário de Gases de Efeito Estufa dos dois cenários avaliados - consumindo gás de síntese gerado a partir do *fluff* e do cenário atual, consumindo o gás natural, ambos na etapa de aquecimento de tarugo nos fornos de laminação.

5.1 Teste Piloto da gaseificação do *fluff*

O teste de gaseificação do *fluff* se iniciou com a preparação do *fluff* em CDRI. Na Figura 25 podem ser vistas imagens do CDRI após a preparação.

Figura 25 – Combustível Derivado de Resíduo - CDRI



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

A etapa de preparação do *fluff* para a conversão em CDRI, que envolve secagem, peneiramento e trituração, é crucial para a segregação de materiais ferrosos, não ferrosos e

finos, uma vez que esses componentes são indesejáveis no processo de gaseificação. Apesar da segregação inicial realizada pela *shredder*, que ocorre antes dessa etapa, frações residuais desses materiais ainda permanecem no *fluff* devido ao seu alto grau de heterogeneidade.

Foram recebidas 6.680 kg de *fluff* para a preparação, resultando em 4.438,35 kg de CDRI (61,95%). O restante do material foi subdividido da seguinte forma: 1.239,14 kg de finos ou terra (18,55%), 730,00 kg de materiais ferrosos e não ferrosos (10,93%) e aproximadamente 757,51 kg de umidade (11,34%). A umidade foi determinada a partir de amostras enviadas ao laboratório, e seu resultado foi extrapolado para o volume total de material beneficiado na etapa de preparação do CDRI. Do total de CDRI preparado, 1.132,5 kg foi gaseificado no teste piloto seguindo o protocolo de testes da empresa especializada responsável pela realização dos testes.

O elevado volume de materiais indesejáveis à gaseificação presentes no *fluff* (finos, ferrosos e não ferrosos) evidencia a necessidade de uma etapa de preparação anterior à gaseificação. Por outro lado, os materiais ferrosos e não ferrosos recuperados nesta etapa foram destinados à reciclagem gerando receita, assim como ocorre com a fração desses materiais recuperada na *shredder*. Já os finos gerados após o beneficiamento foram destinados a um aterro industrial de Classe II, assumindo-se a mesma classificação inicial atribuída ao *fluff*. Contudo, recomenda-se que trabalhos futuros avaliem detalhadamente a composição e o potencial de contaminação dessa fração, a fim de assegurar sua classificação adequada e garantir a correta destinação.

Foram conduzidos três dias de testes de gaseificação com o objetivo de compreender, caracterizar e estabilizar as condições operacionais ideais do processo, de modo a subsidiar o dimensionamento de um sistema otimizado, compatível com as características reais do combustível a ser gaseificado.

A Tabela 5 apresenta o consolidado com as principais entradas e saídas obtidas nos 3 dias de testes, sendo considerado pela empresa responsável pelos testes e também pela projeção do futuro gaseificador o dia 22/04/2024 como o melhor dia em termos de condições operacionais, envolvendo o tempo de alimentação do gaseificador, a dosagem de O₂ e geração de subprodutos.

Tabela 5 – Resumo de entradas e resíduos

Tabela resumo de entradas e resíduos			
Dias	19/04/2024	22/04/2024	24/04/2024
Entrada de CDRI de <i>Fluff</i>	585 kg	285 kg	262,5 kg
Entrada de O₂			
1) Aquecimento	10 m ³	51 m ³	20 m ³
2) Processo	67,49 m ³	78,15 m ³	189 m ³
3) Pós-processo	0 m ³	0 m ³	49 m ³
Cinzas	90 kg 15,4%	50 kg 17,5%	40 kg 15,2%
Óleos	40 L 6,6%	10 L 3,4%	< 0,1 L < 0,04%

Fonte: Dados cedidos pela empresa responsável pelo teste piloto, 2025.

5.1.1 Caracterização do CDRI - Combustível Derivado de Resíduo Industrial (*Fluff*)

A caracterização do Combustível Derivado de Resíduo Industrial (CDRI) – *Fluff* revelou um teor de carbono de 53,0% em massa, conforme análise elementar apresentada na Tabela 6. Yoo et al. (2022) reportaram um teor de carbono de 52,75% em resíduos de *Automobile Shredder Residue* (ASR), o que reforça a similaridade entre os materiais e, consequentemente, a sua aplicabilidade como combustível alternativo em processos térmicos de conversão energética. Tal consistência entre os valores encontrados fortalece a escolha do *fluff* como matéria-prima viável para gaseificação, considerando seu elevado potencial energético.

De acordo com a Resolução SIMA nº 47/2020¹, do Secretariado de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SIMA), o CDRI pode ser preparado a partir de resíduos industriais, desde que atenda a critérios como poder calorífico mínimo, limites de cloro e classificação como resíduo não perigoso (Classe II), conforme a ABNT NBR 10004:2024. O teor de cloro do CDRI analisado foi de 1,74%, um fator crítico para emissões atmosféricas, especialmente na formação de compostos clorados durante a combustão. Já a fração de cinzas, que corresponde a 27,4%, deve ser considerada na avaliação do desempenho do material como combustível alternativo, pois pode impactar a eficiência energética e os sistemas de controle de emissões (Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SIMA), 2020).

¹ A Resolução SIMA nº 47/2020 estabelece diretrizes e critérios para o uso de Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR e CDRI) em fornos de clínquer e outros equipamentos industriais no Estado de São Paulo, definindo parâmetros como poder calorífico mínimo, teor máximo de cloro e exigência de classificação como resíduo não perigoso.

Os parâmetros determinados na Tabela 6 são fundamentais para enquadramento do CDRI nas diretrizes ambientais vigentes. O Artigo 16 da Resolução SIMA nº 47/2020 estabelece que o Poder Calorífico Inferior (PCI) mínimo para diferentes aplicações industriais varia entre 2300 e 4500 kcal/kg, dependendo do tipo de fonte de consumo. Embora a análise elementar não forneça diretamente o PCI, a correlação entre teor de carbono e potencial energético permite estimar a viabilidade do *fluff* como um combustível alternativo.

Tabela 6 – Resultados da análise elementar do CDRI

Amostra 1 - Combustível derivado de resíduos industriais - CDRI (<i>Fluff</i>)	
Composição	% , em massa
Carbono	53,0
Hidrogênio	6,62
Nitrogênio	1,7
Cinzas	27,4
Cloretos (Cl ⁻)	1,74
Enxofre total	0,5

Fonte: Dados cedidos pela empresa responsável pelo teste piloto, 2025.

5.1.2 Caracterização dos subprodutos da gaseificação

Durante o processo de gaseificação, foram gerados os seguintes subprodutos: cinzas, pó do ciclone/trocador e gases condensáveis. A fim de identificar suas características e potenciais aplicações futuras, foi realizada a análise elementar de carbono, hidrogênio, nitrogênio, teor de cinzas e teor de cloreto (Cl⁻) em cada um desses subprodutos.

Adicionalmente, a classificação ambiental, conforme a norma NBR 10004:2024, foi conduzida exclusivamente para as cinzas, devido ao seu maior volume gerado.

A partir dos resultados das análises das cinzas apresentados na Tabela 7, é possível observar a influência do protocolo de alimentação da matéria-prima (*fluff*) no processo de gaseificação sobre a composição dos subprodutos gerados.

Tabela 7 – Resultados da caracterização dos subprodutos da gaseificação.

Designação da amostra	Amostra 2 - Cinzas do resíduo sólido	Amostra 3 - Pó do ciclone/trocador	Amostra 4 - Gases condensáveis
Composição	%, em massa	%, em massa	%, em massa
Carbono	3,00	65,80	7,00
Hidrogênio	0,33	4,02	10,48
Nitrogênio	< 0,1	4,00	0,40
Cinzas	95,30	13,50	0,10
Enxofre	0,57	0,40	< 0,1

Fonte: Dados cedidos pela empresa responsável pelo teste piloto, 2025.

A amostra de cinzas (Amostra 2) apresentou um baixo teor de carbono (3,00%), indicando que a combustão e gaseificação do material foram eficientes. No entanto, em testes anteriores realizados no dia 19/04/2024, registrou-se um teor de carbono significativamente superior nas cinzas, sugerindo uma conversão incompleta. Esse resultado levou à necessidade de ajustes no protocolo de alimentação do gaseificador. Com a otimização do processo nos dias subsequentes, observou-se uma redução expressiva no teor de carbono nas cinzas, confirmando a eficácia da alteração adotada.

Em relação ao pó do ciclone/trocador (Amostra 3), verificou-se um teor elevado de carbono (65,80%), indicando a presença de partículas carbonáceas finas arrastadas pelo fluxo gasoso. Esse comportamento pode estar relacionado às características do *fluff* utilizado e à eficiência do sistema de separação particulada do gaseificador. Além disso, o teor de hidrogênio presente na amostra (4,0%) sugere a possível presença de compostos orgânicos voláteis que podem ser recuperados para aplicação energética. É importante salientar que essa amostra foi obtida antes da adequação dos parâmetros do sistema e que, uma vez corrigidos, não houve mais formação e arraste de particulados ricos em carbono.

Os gases condensáveis (Amostra 4) apresentaram um teor considerável de carbono (7,0%) e hidrogênio (10,40%), o que sugere a presença de hidrocarbonetos de cadeia longa. Essa decomposição incompleta dos gases condensáveis indica uma alta presença de água na amostra. Considerando que o hidrogênio representa apenas 11,1% da massa da molécula de H₂O, o restante (88,9%) corresponde ao oxigênio, evidenciando a formação de uma fração significativa de água nos óleos condensáveis. Esse fator é relevante para a caracterização e possíveis aplicações desse subproduto, pois influencia diretamente seu poder calorífico e potencial de recuperação energética.

Adicionalmente, sugere-se que dentro dos 7% de carbono presentes nos gases condensáveis,

pode haver a presença de partículas carbonáceas sem ligação com hidrogênio, influenciando a totalização da composição química. Essa hipótese reforça a necessidade de uma caracterização mais detalhada desses subprodutos para melhor compreensão de seu comportamento e possíveis usos industriais.

Dessa forma, os ajustes no protocolo de alimentação do CDRI demonstraram ser uma estratégia eficaz para otimizar a geração dos subprodutos, reduzindo o teor de carbono nas cinzas e minimizando a formação excessiva de óleos condensáveis.

A caracterização das cinzas geradas no processo de gaseificação pela NBR 10004:2004 avaliou os parâmetros da Massa Bruta e do Lixiviado, indicando que os teores de certos componentes permanecem dentro dos limites máximos permitidos pela norma, garantindo que as cinzas não sejam classificadas como resíduos perigosos (Classe I). No entanto, a análise da solubilidade revelou a presença de elementos como alumínio, cádmio, ferro, manganês, sulfato e surfactantes em concentrações acima dos valores permitidos para resíduos inertes, conforme definido no Anexo G da NBR 10004. Essa condição enquadra o resíduo na classe IIA (Não Inerte).

Essa classificação indica que, apesar de as cinzas não serem perigosas, elas podem sofrer reações químicas ao longo do tempo, influenciando sua estabilidade ambiental. Isso reforça a necessidade de uma destinação adequada, considerando estratégias como uso em aplicações industriais, coprocessamento em cimenteiras ou encapsulamento para disposição segura. Além disso, a presença desses elementos pode indicar potencial para aproveitamento em processos industriais específicos, como materiais cimentícios ou como insumo secundário em determinados segmentos.

De forma semelhante ao presente estudo, (YOO et al., 2022) também realizaram a caracterização dos subprodutos sólidos da gaseificação de ASR, com foco na recuperação material por meio da fusão da escória para aplicação na fabricação de tijolos cerâmicos. Essa abordagem destaca o potencial de valorização dos resíduos sólidos da gaseificação, convertendo-os em materiais utilizáveis na construção civil, o que pode inspirar futuras investigações sobre rotas de reaproveitamento similares para os subprodutos do *fluff* gaseificado. A possibilidade de reaproveitamento dos resíduos sólidos não apenas minimiza a necessidade de disposição final, mas também contribui para a circularidade dos materiais e para o fortalecimento da sustentabilidade do processo.

5.1.3 Caracterização do gás de síntese

O monitoramento realizado nos dias 19 e 22 de abril de 2024 indicou que a geração específica de gás de síntese foi da ordem de $1,0241 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ de *Fluff*, demonstrando a viabilidade energética do processo. Esse valor está em linha com o intervalo relatado na literatura para resíduos de composição semelhante, como os apresentados por (YOO et al., 2022), que variaram entre 0,9 e $1,2 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ dependendo da temperatura do processo e da variação da carga.

A análise composicional do gás de síntese revelou uma mistura de 71,5% de metano (CH_4), 14,80% de dióxido de carbono (CO_2) e 3,65% de monóxido de carbono (CO), além da presença de compostos orgânicos voláteis (COVs) em uma fração de 0,13%, com um resultado médio conforme a Tabela 8 seguir. Esses valores diferem dos relatados por (MANENTE et al., 2022) nos quais o CO e o H_2 costumam ser majoritários, com CH_4 inferior a 10%. Essa diferença provavelmente está relacionada ao fato de o equipamento utilizado neste teste ter sido projetado para biomassa com o objetivo de gerar energia elétrica por meio de um grupo gerador. Assim, foi concebido para receber e utilizar materiais que favorecessem reações de metanação (ação catalítica para formação do CH_4), de modo a produzir um gás com composição semelhante à do gás natural, facilitando sua utilização no motogerador. Esse fato também explica a ausência de detecção de H_2 na composição final do gás, uma vez que esse gás tende a ser consumido nos mecanismos catalíticos de formação de CH_4 . Neste contexto, uma vez que o uso final do gás de síntese será a substituição do gás natural, essas reações catalíticas se mostram tecnicamente desejáveis.

Por outro lado, considerando o elevado teor de metano identificado, recomenda-se que trabalhos futuros incluam a realização de testes sazonais. Essa abordagem permitirá avaliar possíveis variações na composição do gás de síntese ao longo do tempo, especialmente no teor de CH_4 , contribuindo para uma caracterização mais robusta e representativa do processo.

Tabela 8 – Composição do gás de síntese.

Composição do gás de síntese	Concentração (%)
CH ₄	71,50
CO ₂	14,80
CO	3,65
O ₂	6,00
COVs	0,13
H ₂ O*	3,92
TOTAL	100,00

* Dados estimados.

Fonte: Dados cedidos pela empresa responsável pelo teste piloto, 2025.

Contudo, a realização de testes como a combustão da chama do *flare* do gás de síntese, e utilização do gás de síntese na alimentação do motogerador a gás natural, comprova seu potencial como um gás combustível viável para aplicações energéticas. As imagens da Figura 26 e da Figura 27, apresentam a chama do *flare* e o motogerador utilizado no teste, respectivamente.

Figura 26 – Chama do *flare* com gás de síntese



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Figura 27 – Motogerador movido a Gás Natural



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

No que se refere aos COVs, as medições realizadas para identificar as concentrações individuais dos compostos presentes no gás de síntese indicaram maior ocorrência de estireno, etilbenzeno e tolueno, conforme apresentado na Tabela 9, para os dias 19/04/2025 e 22/04/2025. Ressalta-se que, devido à indisponibilidade do laboratório especializado, não foi possível realizar a coleta no dia 24/04/2025. Cabe destacar, ainda, que não existem na legislação brasileira padrões específicos para a emissão de COVs provenientes da gaseificação de resíduos, o que exige uma avaliação caso a caso quanto à aplicabilidade do gás de síntese gerado.

Tabela 9 – Resultados dos COVs no gás de síntese.

Parâmetros	1ª coleta 19/04/2024	2ª coleta 22/04/2024	Valores Médios
CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE GASOSO			
Horário das Coletas	13:30–13:50	14:45–15:05	–
Pressão Absoluta (mmHg)**	696,0	696,0	696,0
VALORES DE ORSAT			
Teor de Oxigênio (% vol.)*	6,0	6,0	6,0
Teor de Dióxido de Carbono (% vol.)*	14,8	14,8	14,8
Teor de Monóxido de Carbono (% vol.)*	0,0	0,0	0,0
CONCENTRAÇÃO DOS POLUENTES			
4-Metil-2-Pentanona (mg/Nm ₃)**	2,01	1,38	1,70
Benzeno (mg/Nm ₃)**	1.009,45	424,41	716,93
Diclorometano (mg/Nm ₃)**	<0,61	3,43	2,02
Clorobenzeno (mg/Nm ₃)**	7,18	6,61	6,89
Estireno (mg/Nm ₃)**	28.215,82	2.804,66	15.510,24
Etilbenzeno (mg/Nm ₃)**	26.817,19	1.538,24	14.177,72
m,p-Xilenos (mg/Nm ₃)**	2.596,59	157,53	1.377,06
o-Xileno (mg/Nm ₃)**	28,70	39,54	34,12
p-Isopropiltolueno (mg/Nm ₃)**	0,70	<0,62	0,66
Tolueno (mg/Nm ₃)**	10.459,31	704,25	5.581,78
1,3,5-Trimetilbenzeno (mg/Nm ₃)**	6,26	3,64	4,95
1,2,4-Trimetilbenzeno (mg/Nm ₃)**	4,67	2,03	3,35
n-Propilbenzeno (mg/Nm ₃)**	12,22	5,65	8,94
sec-Butilbenzeno (mg/Nm ₃)**	1,13	<0,62	0,87
Isopropilbenzeno(mg/Nm ₃)**	3.563,46	254,52	1.908,99
Acetona (mg/Nm ₃)**	9,12	11,49	10,31
HCT (como propano) (mg/Nm ₃)**	5.290,47	3.465,67	4.378,07

* Na seção onde está situado o ponto de coleta.

** Nas condições do ponto de coleta.

*** Nas condições normais – base seca (0°C e 1 atm).

Fonte: Laboratório de análises EAAX Ambiental, 2024.

O uso de gás de síntese em processos industriais deve atender aos limites de emissão estabelecidos na Resolução SMA nº 79, de 04 de novembro de 2009 (Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA), 2009), e na Decisão de Diretoria CETESB nº 326/2014/I (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), 2014). As emissões monitoradas durante os testes experimentais confirmam que as concentrações de monóxido de carbono (CO) e metano (CH₄) encontravam-se abaixo dos limites estabelecidos em legislação. A maior concentração de CO foi de 3,76%, enquanto a de CH₄ foi de 70,99%, valores compatíveis

com aplicações energéticas do gás de síntese.

Além disso, a medição das concentrações de cloro total (Cl_2 e HCl) no lavador de gases, conforme Tabela 10, evidenciou que os valores na saída foram significativamente reduzidos em comparação com a entrada, indicando a eficiência do sistema de controle. A concentração média de HCl na saída foi de $4,20 \text{ mg/Nm}^3$, estando dentro do limite máximo permitido de $10,00 \text{ mg/Nm}^3$ pela Decisão de Diretoria CETESB nº 326/2014/I.

Tabela 10 – Comparação entre a entrada e a saída do lavador de gases – Ácido Clorídrico e Cloro Livre ($\text{HCl} + \text{Cl}_2$).

Parâmetros	Entrada (média)	Saída (média)	Redução (%)
CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE GASOSO			
Pressão Absoluta (mmHg)**	696,0	696,0	–
VALORES DE ORSAT			
Teor de Oxigênio (% vol.)*	5,9	6,0	–
Teor de Dióxido de Carbono (% vol.)*	14,8	14,8	–
Teor de Monóxido de Carbono (% vol.)*	0,0	0,0	–
CONCENTRAÇÃO DOS POLUENTES			
HCl (mg/Nm_3)**	11,34	4,20	62,9
Cl_2 (mg/Nm_3)**	4,00	3,11	22,3

* Na seção onde está situado o ponto de coleta.

** Nas condições do ponto de coleta.

*** Nas condições normais – base seca (0°C e 1 atm).

Fonte: Laboratório de análises EAAX Ambiental, 2024.

A composição do gás de síntese gerado indica um potencial energético significativo, principalmente devido ao elevado teor de metano. Com isso, é possível sugerir que o gás pode ser empregado como combustível alternativo na substituição de fontes fósseis, reduzindo a pegada de carbono de processos industriais.

5.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicada aos três cenários modelados, a saber: (i) Cenário 1, que considera a produção e o uso de gás de síntese a partir da gaseificação do *fluff* como fonte térmica; (ii) Cenário 2, referente à produção e uso de gás natural, considerado como referência convencional; e (iii) Cenário 3, que

contempla a disposição final do *fluff* em aterro sanitário, sem qualquer forma de recuperação energética.

O público alvo deste estudo destina-se a tomadores de decisão da indústria siderúrgica, particularmente gestores de sustentabilidade, engenharia de processos e planejamento estratégico, interessados em alternativas tecnológicas para descarbonização e valorização energética de resíduos industriais. Além disso, os resultados podem ser úteis para instituições públicas e privadas que atuam na formulação de políticas de economia circular, gestão de resíduos e transição energética no setor industrial.

A abordagem metodológica adotada neste estudo segue o modelo do tipo berço ao portão (*cradle-to-gate*), analisando os impactos ambientais potenciais gerados desde o início da cadeia até o ponto de uso do gás como fonte térmica no forno de reaquecimento de tarugos, sem considerar as etapas posteriores de uso do produto final ou seu descarte.

Optou-se por uma abordagem de modelagem atribucional, uma vez que o objetivo principal foi descrever os impactos ambientais associados ao sistema atual e às suas possíveis alternativas, baseando-se em médias representativas e fluxos observados. Nesse contexto, o modelo *Cut-off*, utilizado nas bases de dados do *Ecoinvent*, foi aplicado por estar alinhado a essa abordagem. Este modelo atribui os impactos apenas aos fluxos diretamente relacionados ao sistema analisado, excluindo encargos ambientais associados a materiais recicláveis ou subprodutos secundários que saem do sistema produtivo.

A abrangência tecnológica da modelagem foi específica, voltada a um caso particular, refletindo as características técnicas e operacionais da unidade industrial em estudo. A extensão temporal, por sua vez, foi extrapolada para um horizonte de um ano de operação, a fim de permitir a comparação dos cenários em termos anuais de desempenho ambiental.

As fronteiras do sistema foram estabelecidas conforme definido na Subsubseção 4.2.1.2, delimitando os processos considerados em cada cenário. Essa delimitação permitiu isolar os fluxos pertinentes à geração e ao uso dos vetores energéticos ou à disposição final do resíduo, mantendo a consistência entre os sistemas analisados.

Os resultados são apresentados por meio de gráficos que expressam os impactos ambientais normalizados para cada uma das 18 categorias consideradas pelo método ReCiPe 2016 *Midpoint* (H). Este método é amplamente utilizado em estudos de ACV no contexto do Brasil, por sua cobertura abrangente, clareza na interpretação dos resultados e robustez metodológica.

A normalização foi empregada com o objetivo de evidenciar a contribuição relativa de cada processo em cada etapa, facilitando a comparação entre os cenários. Para melhorar a

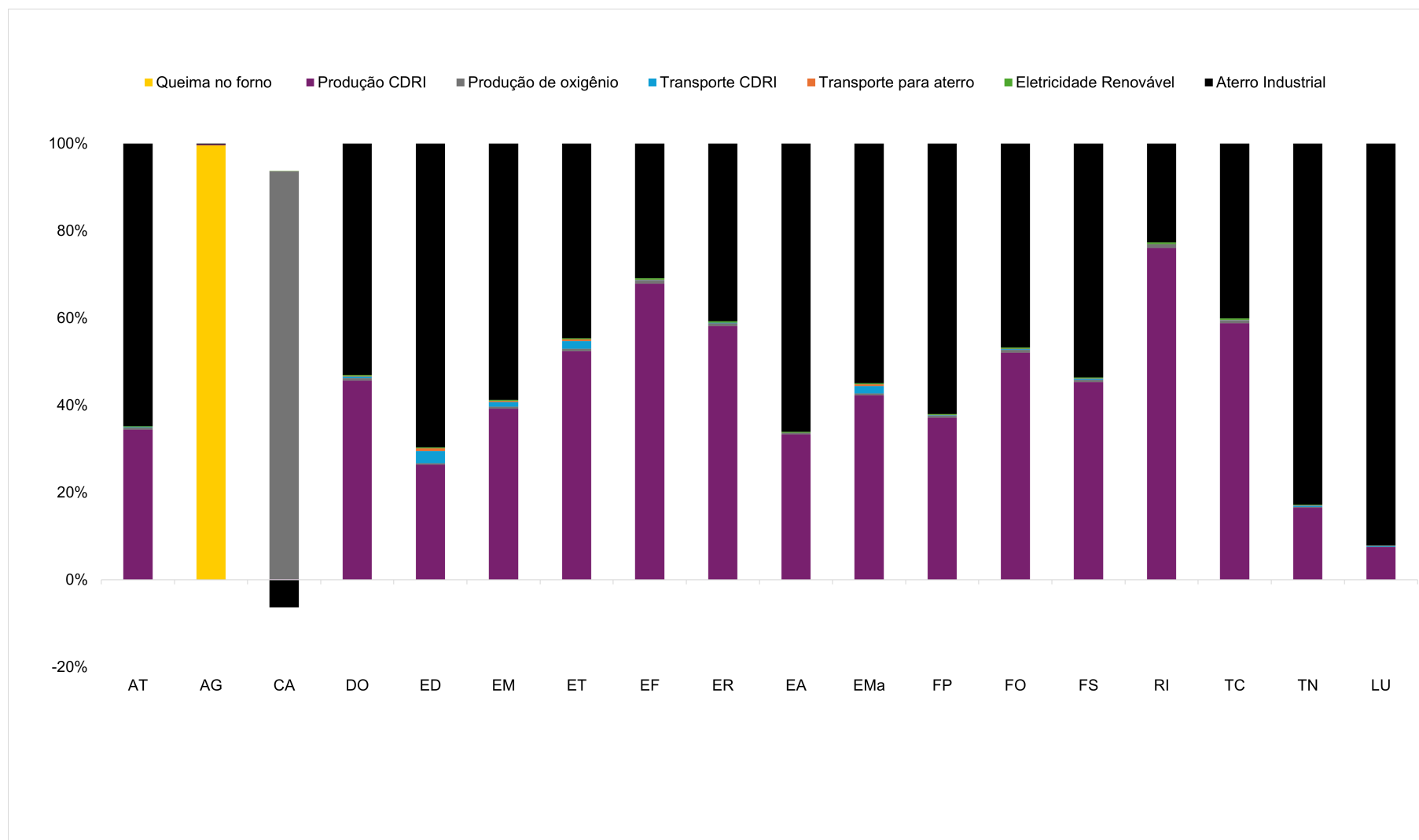
visualização nos gráficos, as categorias de impacto foram representadas por siglas, conforme descrito a seguir:

- Aquecimento global (AG)
- Acidificação Terrestre (AT)
- Consumo de água (CA)
- Depleção da camada de ozônio estratosférico (DO)
- Ecotoxicidade em água doce (ED)
- Ecotoxicidade marinha (EM)
- Ecotoxicidade terrestre (ET)
- Escassez de recursos fósseis (EF)
- Escassez de recursos minerais (ER)
- Eutrofização de água doce (EA)
- Eutrofização marinha (EMa)
- Formação de material particulado fino (FP)
- Formação de ozônio, ecossistemas terrestres (FO)
- Formação de ozônio, saúde humana (FS)
- Radiação ionizante (RI)
- Toxicidade carcinogênica para humanos (TC)
- Toxicidade não carcinogênica para humanos (TN)
- Uso da terra (LU)

5.2.1 Cenário 1: Produção e uso de gás de síntese

A Figura 28 apresenta o perfil de impacto ambiental do Cenário 1 – Produção e uso de gás de síntese, distribuído por etapas do processo. Este cenário representa os impactos associados à geração de 1 MJ de calor (unidade funcional), considerando como fonte de energia elétrica apenas a eletricidade renovável, proveniente do parque eólico da empresa em análise.

Figura 28 – Perfil de impacto por etapa – Cenário 1: Produção e uso de gás de síntese



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Os impactos ambientais foram atribuídos às seguintes etapas do processo, conforme representadas na Figura 28:

- Produção de CDRI
- Transporte do CDRI até a unidade de gaseificação
- Produção de oxigênio (produzido nos limites operacionais da unidade de gaseificação e produção de aço)
- Eletricidade renovável (utilizada em todos os processos)
- Queima no forno (utilização do gás de síntese como fonte térmica no forno de reaquecimento de tarugo)
- Transporte dos resíduos da gaseificação para aterro industrial
- Aterro industrial (destinação final dos resíduos sólidos gerados no processo de gaseificação)

Os resultados normalizados demonstram a contribuição relativa de cada etapa do processo de gaseificação do *fluff* em diferentes categorias de impacto ambiental. Observa-se que a produção do CDRI apresenta contribuição predominante na maioria das categorias, especialmente aquelas relacionadas à ecotoxicidade (ED, EM, ET), formação de ozônio e material particulado (FO, FS, FP), toxicidade humana (TC, TN) e escassez de recursos (EF, ER). Essa influência decorre principalmente do elevado consumo de eletricidade nesta etapa, o que acarreta impactos associados a processos auxiliares presentes no modelo de geração de energia renovável, como o uso de lubrificantes e a gestão de resíduos operacionais das turbinas eólicas.

A queima do gás de síntese no forno apresenta impacto significativo apenas na categoria Aquecimento Global (AG), responsável por aproximadamente 99,6% da contribuição, devido à emissão de CO₂ durante a combustão, o que é compatível com a natureza do processo.

A produção de oxigênio destaca-se na categoria Consumo de Água (CA), sendo responsável por mais de 100% da carga de impacto nessa categoria, reflexo do uso de água nos processos de separação criogênica.

A etapa de aterro industrial, associada à destinação dos resíduos sólidos gerados na gaseificação, apresenta contribuição relevante não apenas na categoria de Uso da Terra (UL) — com mais de 90% da carga de impacto —, mas também em diversas outras, como ecotoxicidade em água doce e marinha (ED, EM), ecotoxicidade terrestre (ET), toxicidade humana cancerígena e

não cancerígena (TC, TN) e radiação ionizante (RI). Esses impactos estão fortemente relacionados à presença de lixiviados e suas respectivas rotas de tratamento, conforme modelado no banco *Ecoinvent*.

Além disso, observa-se um impacto negativo (benefício ambiental) na categoria Consumo de Água (CA) atribuído à etapa de aterro industrial. Esse resultado ocorre porque, no modelo de inventário, o processo de tratamento do lixiviado inclui etapas de reuso parcial da água recuperada, que é reinserida no sistema em substituição à captação de água limpa. Assim, o balanço líquido de consumo hídrico torna-se negativo, refletindo uma redução efetiva na demanda por recursos hídricos primários. Esse comportamento não implica ausência de consumo, mas sim um crédito ambiental decorrente da recuperação e reaproveitamento de parte da água utilizada no processo.

Por fim, a eletricidade renovável, oriunda de fonte eólica, apresenta contribuição praticamente nula na maioria das categorias de impacto, evidenciando os benefícios ambientais associados a essa matriz elétrica.

5.2.2 Cenário 2: Produção e uso de gás natural

A Figura 29 apresenta o perfil de impacto ambiental do Cenário 2 – Produção e uso de gás natural, distribuído por etapas do processo. Este cenário representa os impactos associados à geração de 1 MJ de calor (unidade funcional), considerando o uso de gás natural como fonte térmica no forno de reaquecimento de tarugo.

Os impactos ambientais foram atribuídos às seguintes etapas do processo, conforme representadas na figura:

- Processos gás natural (incluindo extração, transporte e distribuição)
- Queima no forno (utilização do gás natural como fonte térmica no forno de reaquecimento de tarugo)
- Eletricidade (consumo em processos auxiliares)

A etapa denominada “processos gás natural” apresenta contribuição predominante na maioria das categorias de impacto, resultado do uso de um conjunto genérico de processos de fornecimento global de gás natural disponível na base de dados *Ecoinvent*. Esse mix contempla rotas de fornecimento via importação de mercado, produção *offshore* e produção *onshore*. A importação considera o transporte internacional do gás natural, perdas por vazamentos, emissões

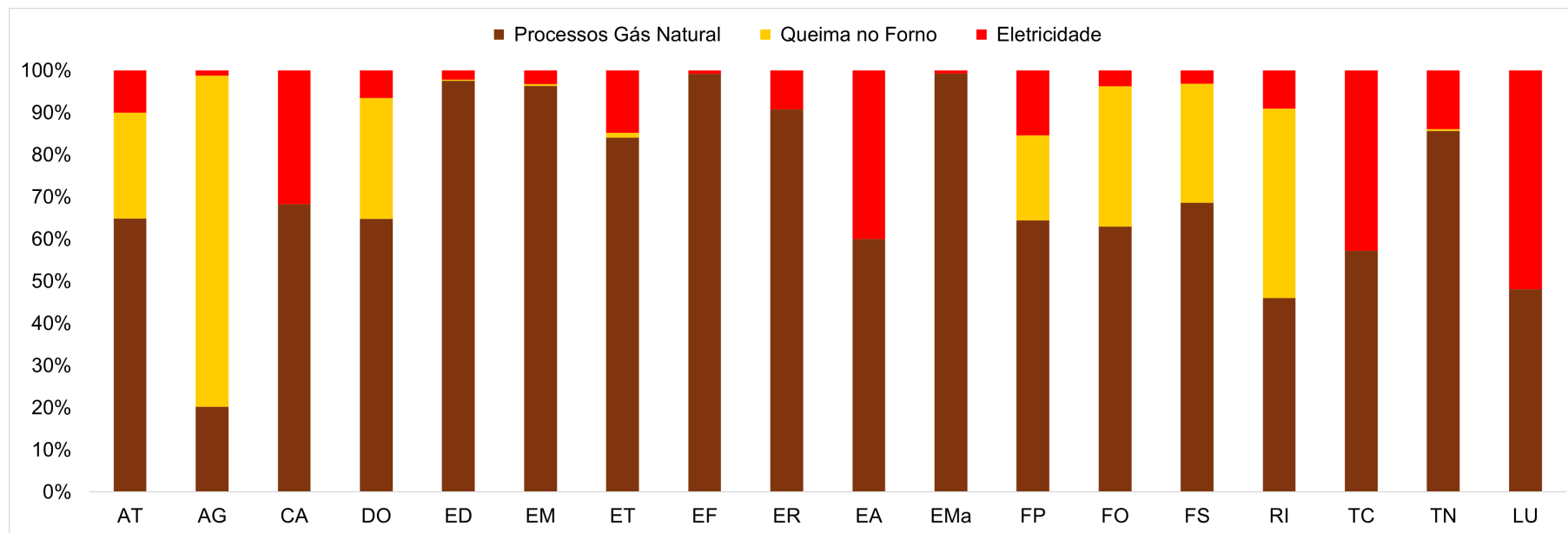
fugitivas e impactos associados ao armazenamento sazonal. Já os processos *offshore* e *onshore* envolvem etapas complexas com uso de combustíveis pesados (óleo e diesel), processos químicos, operação de turbinas e emissões para o solo, a água e a atmosfera.

Esses fatores explicam a forte contribuição dessa etapa para categorias como aquecimento global (AG), toxicidade humana (TC, TN), ecotoxicidade em água doce e marinha (ED, EM), ecotoxicidade terrestre (ET), escassez de recursos minerais e fósseis (ER, EF), e formação de material particulado fino (FP). Os impactos estão diretamente relacionados às emissões fugitivas de metano, à queima de combustíveis fósseis nas operações de extração e refino, e à infraestrutura necessária para transporte e distribuição.

A queima do gás natural no forno apresenta contribuição expressiva nas categorias relacionadas à formação de ozônio para a saúde humana (FO), formação de ozônio para ecossistemas terrestres (FS), formação de material particulado (FP) e acidificação terrestre (EA), em função da emissão de poluentes atmosféricos como NO_x e SO_2 durante o processo de combustão.

A eletricidade apresenta contribuição menor em quase todas as categorias, mas se destaca pontualmente nas categorias de radiação ionizante (RI) e depleção da camada de ozônio (DO), o que pode estar associado à matriz elétrica considerada no inventário da base *Ecoinvent*, composta por fontes diversas, incluindo termoelétricas fósseis e nuclear.

Figura 29 – Perfil de impacto por etapa – Cenário 2: Produção e uso de gás natural



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

5.2.3 Comparação entre os cenários 1 e 2

A Figura 30 apresenta a comparação entre os impactos ambientais normalizados para os dois cenários estudados: Cenário 1 (produção e uso de gás de síntese) e Cenário 2 (produção e uso de gás natural). A normalização foi realizada considerando o valor mais alto observado em cada categoria de impacto como referência (100%), o que permite visualizar de forma relativa a contribuição de cada cenário para as diferentes categorias.

Observa-se que o Cenário 1 apresentou menor impacto em 17 das 18 categorias avaliadas, com exceção da categoria Consumo de Água (CA), na qual o gás de síntese apresenta resultado superior ao do gás natural. Este resultado está relacionado principalmente ao consumo expressivo de água na etapa de separação criogênica do oxigênio, necessária para a gaseificação do *fluff*. Em contrapartida, o Cenário 2 (gás natural) apresenta impacto significativamente superior nas demais categorias, evidenciando os benefícios ambientais da substituição do combustível fóssil por gás de síntese.

Destaca-se a categoria Aquecimento Global (AG), na qual a redução no impacto alcança aproximadamente 26% em relação ao gás natural. Essa diferença é evidenciada pelos fatores de emissão apresentados na Tabela 11: enquanto o gás de síntese gera, em média, 0,06 toneladas CO₂ eq por MJ de energia útil, o gás natural apresenta um fator de 0,08 t CO₂ eq/MJ.

Tal desempenho mais favorável do gás de síntese se deve, em grande parte, à presença de carbono biogênico no *fluff*, proveniente de frações de materiais de origem orgânica (como tecidos, papéis e madeira) presentes no resíduo. A determinação do carbono biogênico no *fluff* foi realizada a partir da análise gravimétrica das frações que compõem o resíduo, considerando o percentual de carbono biogênico presente em cada material conforme Tabela 3 da Subseção 4.2.2. Dessa forma, estimou-se que aproximadamente 60% do carbono total presente no *fluff* está associado às frações analisadas, dos quais 42% foram classificados como fósseis e 12% como biogênicos. Essa mesma proporção foi adotada na definição do fator de emissão de CO₂ após a combustão do gás de síntese. Como resultado, de 100% do CO₂ emitido após a queima do gás de síntese, cerca de 20% foi considerado de origem biogênica, ao passo que 80% foi classificado como não biogênico.

Conforme o método ReCiPe *Midpoint*, as emissões de CO₂ oriundas de fontes biogênicas são consideradas neutras do ponto de vista climático, ou seja, são atribuídas a elas um fator de caracterização nulo. Isso ocorre porque o carbono biogênico circula naturalmente entre a biosfera e a atmosfera no curto prazo, dentro do que se denomina "ciclo biogênico fechado de carbono",

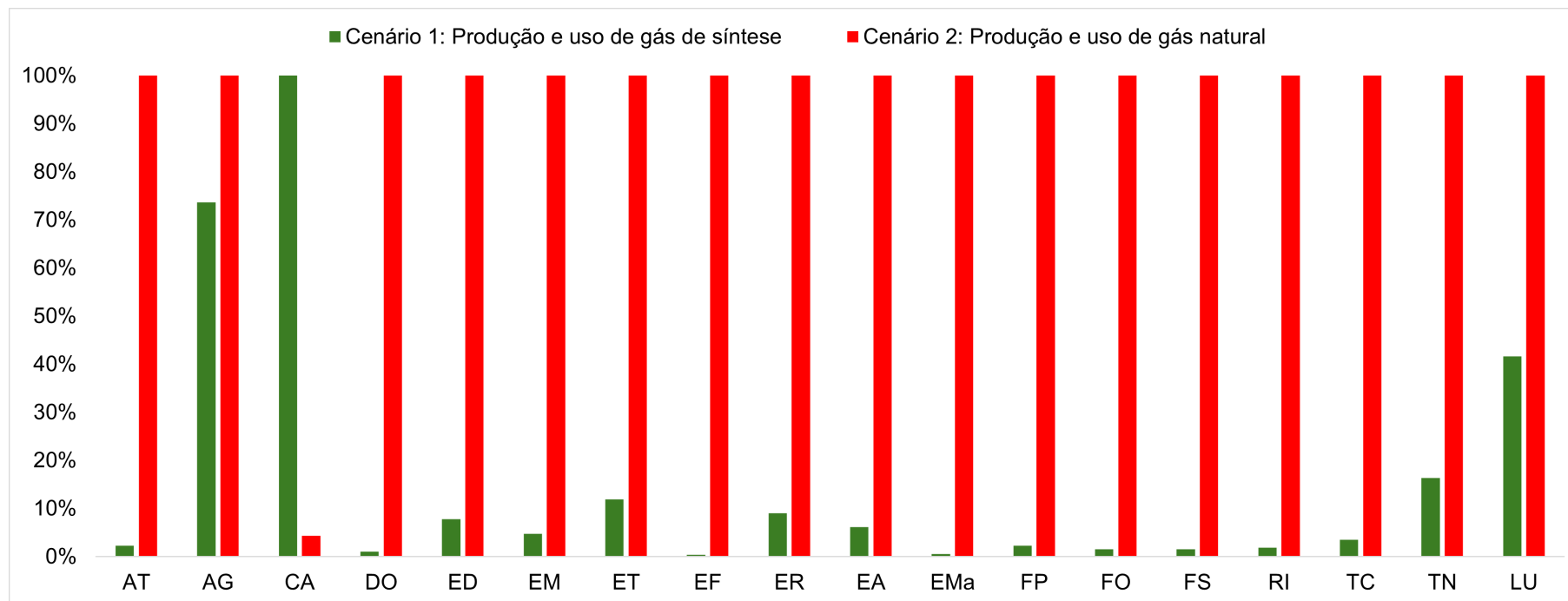
e, portanto, sua liberação para a atmosfera durante a queima não representa acréscimo líquido ao estoque global de gases de efeito estufa.

Neste contexto, a substituição do gás natural por gás de síntese a partir da gaseificação do *fluff* representa uma estratégia relevante de mitigação das mudanças climáticas, ao permitir a valorização de resíduos industriais ao mesmo tempo em que reduz a dependência de combustíveis fósseis.

Além disso, o Cenário 1 apresenta desempenho significativamente melhor nas categorias relacionadas à toxicidade (TC, TN), ecotoxicidade (ED, EM, ET), escassez de recursos (EF, ER), e uso da terra (UL), o que reforça o papel da gaseificação do *fluff* como solução mais sustentável e alinhada aos princípios da economia circular e da gestão integrada de resíduos.

Para melhor visualização dos valores absolutos obtidos em cada categoria, apresenta-se a Tabela 11, que sintetiza os resultados de caracterização por unidade funcional (1 MJ de energia térmica útil gerada). A tabela permite identificar não apenas a superioridade do gás de síntese em termos ambientais, mas também quantificar o potencial impacto em cada categoria.

Figura 30 – Comparação entre os cenários – Gás de síntese vs. Gás natural



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Tabela 11 – Resultados de caracterização por categoria de impacto para os dois cenários (por MJ de energia útil).

Sigla	Categoria de Impacto	Unidade	Cenário 1: Gás de síntese	Cenário 2: Gás natural	% Redução
AG	Aquecimento global	kg CO ₂ eq	5,53E-02	7,52E-02	-26%
AT	Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	6,64E-07	2,93E-05	-98%
CA	Consumo de água	m ³	3,03E-04	1,29E-05	96%
DO	Depleção da camada de ozônio	kg CFC11 eq	4,10E-11	4,04E-09	-99%
ED	Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DCB	4,73E-07	6,10E-06	-92%
EM	Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	1,13E-06	2,38E-05	-95%
ET	Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	6,07E-04	5,11E-03	-88%
EF	Escassez de recursos fósseis	kg óleo eq	1,03E-04	2,85E-02	-100%
ER	Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	1,02E-07	1,13E-06	-91%
EA	Eutrofização de água doce	kg P eq	6,44E-09	1,05E-07	-94%
EMa	Eutrofização marinha	kg N eq	2,87E-09	5,60E-07	-99%
FP	Formação de material particulado fino	kg PM2.5 eq	2,76E-07	1,21E-05	-98%
FO	Formação de ozônio, ecossistemas	kg NOx eq	1,02E-06	6,87E-05	-99%
FS	Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	8,54E-07	5,76E-05	-99%
RI	Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	2,86E-07	1,56E-05	-98%
TC	Toxicidade carcinogênica	kg 1,4-DCB	5,42E-07	1,56E-05	-97%
TN	Toxicidade não carcinogênica	kg 1,4-DCB	6,23E-05	3,82E-04	-84%
LU	Uso da terra	m ² ano eq	8,59E-06	2,06E-05	-58%

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

5.2.4 Cenário 3: Disposição do *fluff* em aterro sanitário

O Cenário 3 foi modelado com o objetivo de estimar os impactos ambientais evitados ao se optar pela valorização energética do *fluff* em substituição à sua disposição final em aterro sanitário. Para isso, foi adotada como referência a massa de 1 kg de *fluff*, o que permite a comparação direta com inventários baseados em massa no contexto de ACV.

A modelagem evidenciou a relevância ambiental da substituição de rotas convencionais de disposição por tecnologias de valorização energética, não apenas sob a ótica da economia circular, mas também como estratégia de descarbonização e mitigação de impactos tóxicos em sistemas industriais.

Os resultados quantitativos das cargas evitadas por categoria de impacto estão apresentados na Tabela 12 divididos entre a etapa de transporte e a etapa de aterro.

Tabela 12 – Impactos ambientais evitados ao recuperar energeticamente o *fluff* (1 kg) em vez de enviá-lo ao aterro.

Sigla	Categoria de Impacto	Unidade	Impacto Evitado (Transporte)	Impacto Evitado (Aterro)	Impacto Evitado (Total)
AT	Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	1,60E-08	4,72E-04	4,72E-04
AG	Aquecimento global	kg CO ₂ eq	5,43E-06	2,5892E-01	2,59E-01
CA	Consumo de água	m ³	1,22E-08	1,53E-04	1,53E-04
DO	Depleção da camada de ozônio estratosférico	kg CFC11 eq	2,61E-12	1,98E-08	1,98E-08
ED	Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DCB eq	2,18E-07	2,04E-01	2,04E-01
EM	Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB eq	1,95E-07	2,78E-01	2,78E-01
ET	Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB eq	1,70E-04	4,52E-01	4,52E-01
EF	Escassez de recursos fósseis	kg óleo eq	1,55E-06	3,10E-02	3,10E-02
ER	Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	1,46E-09	8,23E-04	8,23E-04
EA	Eutrofização de água doce	kg P eq	2,23E-11	4,56E-06	4,56E-06
EMa	Eutrofização marinha	kg N eq	7,94E-10	2,16E-05	2,16E-05
FP	Formação de material particulado fino	kg PM _{2,5} eq	7,36E-09	1,96E-04	1,96E-04
FO	Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	kg NO _x eq	3,70E-08	6,32E-04	6,32E-04
FS	Formação de ozônio, saúde humana	kg NO _x eq	3,62E-08	6,19E-04	6,19E-04
RI	Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	4,59E-10	1,70E-04	1,70E-04
TC	Toxicidade carcinogênica para humanos	kg 1,4-DCB eq	8,55E-09	2,39E-01	2,39E-01
TN	Toxicidade não carcinogênica para humanos	kg 1,4-DCB eq	2,90E-06	2,47E+01	2,47E+01
LU	Uso da terra	m ² ano cultura eq	2,74E-07	2,62E-03	2,62E-03

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.2.5 Análise de Sensibilidade

Com o objetivo de avaliar a influência da fonte de eletricidade nos impactos ambientais do processo de gaseificação, foi realizada uma análise de sensibilidade variando-se o único parâmetro possível entre os cenários modelados: a origem da energia elétrica no Cenário 1 – Produção e uso de gás de síntese.

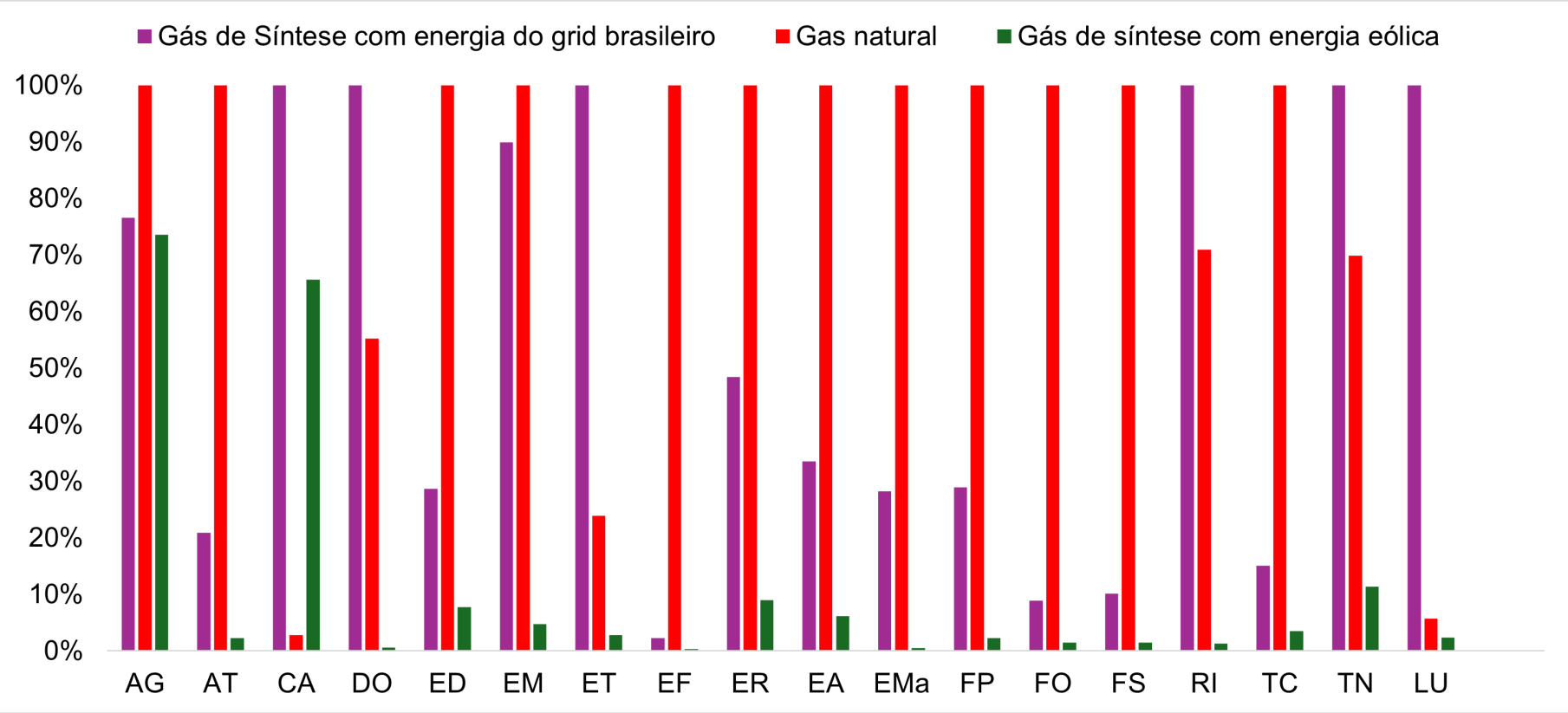
Na modelagem principal, foi considerada apenas energia de origem eólica, em consonância com a realidade da unidade industrial em estudo, a qual é abastecida por um parque eólico próprio. No entanto, visando avaliar a viabilidade da expansão do sistema de gaseificação para outras unidades industriais com diferentes matrizes elétricas, foi incluído um cenário alternativo

no qual a energia utilizada é proveniente do *grid* elétrico brasileiro.

Os demais parâmetros do processo, como o consumo específico de oxigênio, temperatura de operação e taxa de conversão de carbono, foram mantidos constantes, uma vez que foram obtidos a partir de dados primários de um teste piloto.

A Figura 31 apresenta o resultado dessa comparação entre os três cenários: gás natural, gás de síntese com energia eólica e gás de síntese com energia do *grid* brasileiro.

Figura 31 – Resultados normalizados de impacto ambiental dos cenários de gás natural e gás de síntese com diferentes origens de energia elétrica



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Os resultados demonstram que o cenário com eletricidade proveniente do *grid* brasileiro apresenta desempenho ambiental superior ao do gás natural na maioria das categorias de impacto avaliadas. Em categorias relevantes como aquecimento global e escassez de recursos fósseis, o uso do gás de síntese – mesmo associado à matriz elétrica nacional – mostrou menores impactos do que o uso de gás natural.

Por outro lado, observa-se que em algumas categorias específicas, como depleção da camada de ozônio, ecotoxicidade terrestre, radiação ionizante, toxicidade não carcinogênica para humanos e uso da terra, o desempenho do cenário com energia do *grid* brasileiro é menos favorável, apresentando valores superiores aos do gás natural e ao do cenário eólico. Isso indica que, embora a substituição do gás natural pelo gás de síntese seja ambientalmente vantajosa de forma geral, o perfil de impacto pode variar de acordo com a categoria analisada e com a matriz elétrica considerada.

De forma destacada, os resultados evidenciam que o uso de energia elétrica de origem eólica potencializa significativamente os benefícios ambientais da gaseificação do *fluff*. Quando a eletricidade utilizada provém de fonte renovável, as reduções nas emissões de gases de efeito estufa e nos impactos relacionados à escassez de recursos fósseis são ainda mais expressivas, reforçando o papel das energias limpas na transição para uma siderurgia de baixo carbono.

Essas conclusões estão em consonância com a literatura, que aponta a valorização energética do *fluff* como uma rota promissora de mitigação de impactos ambientais quando comparada à disposição em aterros (CIACCI et al., 2010; DANISH ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2015; MANENTE et al., 2022). O presente estudo, ao incorporar dados primários obtidos em escala semi-industrial, amplia a robustez desses achados e reforça a viabilidade ambiental da gaseificação do *fluff*, especialmente quando associada a fontes renováveis de energia.

5.2.6 Avaliação da qualidade dos dados e limitações do estudo

A avaliação da qualidade dos dados utilizada neste estudo foi baseada na matriz de *pedigree* conforme descrito na Subsubseção 4.2.1.2 apresentada na Quadro 5. Essa abordagem é amplamente empregada em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida para avaliar a robustez e a confiabilidade dos dados primários e secundários, especialmente em análises de incerteza e sensibilidade.

Os resultados atribuídos aos três cenários modelados (produção de gás de síntese, uso de

gás natural e disposição em aterro do *fluff*) estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Avaliação qualitativa da qualidade dos dados segundo a matriz de pedigree

Critério	Produção de gás de síntese	Gás natural	Fluff para aterro
Confiança	2	4	2
Representatividade	4	3	4
Correlação temporal	1	1	1
Correlação geográfica	1	2	2
Correlação técnica	1	3	3
Pontuação total	9	13	12
Nível de qualidade dos dados	Alto	Médio	Médio

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

No processo de avaliação pela matriz de *pedigree*, cada critério recebeu uma pontuação atribuída com base nas definições propostas por Weidema e Wesnæs (1996), conforme detalhado a seguir:

Produção de gás de síntese (pontuação total = 9, nível de qualidade alto): *Confiança* (2) — os dados foram obtidos por medições diretas em testes piloto, com verificações parciais baseadas em hipóteses complementares (ex.: balanços de massa), enquadrando-se no nível 2. *Representatividade* (4) — o *fluff* utilizado é proveniente de uma única empresa relevante no mercado nacional, refletindo bem a realidade do estudo de caso, mas não cobrindo toda a variabilidade de fornecedores, o que corresponde ao nível 4. *Correlação temporal* (1) — dados atuais, coletados no período de realização dos testes (menos de 3 anos da referência). *Correlação geográfica* (1) — inventário representativo da própria região de estudo, visto que o material foi coletado localmente. *Correlação técnica* (1) — os testes foram conduzidos com tecnologia de gaseificação diretamente aplicável ao caso em análise (mesma rota tecnológica).

Gás natural (pontuação total = 13, nível de qualidade médio): *Confiança* (4) — os dados do *Ecoinvent* 3.10 são baseados em estimativas consolidadas e em modelagens médias globais, não em medições locais, enquadrando-se no nível 4. *Representatividade* (3) — o inventário contempla médias globais de fornecimento, cobrindo menos de 50% do mercado relevante para o Brasil, mas ainda dentro de parâmetros aceitos. *Correlação temporal* (1) — dados atualizados até 2023, menos de 3 anos da referência. *Correlação geográfica* (2) — refere-se ao contexto mundial, que inclui a região de estudo apenas de forma agregada, caracterizando

nível 2. *Correlação técnica* (3) — a modelagem considera combustão em caldeiras de pequeno porte, distintas do uso em fornos siderúrgicos, embora a tecnologia básica (combustão de gás natural) seja a mesma.

***Fluff* para aterro (pontuação total = 12, nível de qualidade médio):** *Confiança* (2) — os dados de aterro do *Ecoinvent* são verificados e amplamente utilizados, porém não localmente monitorados, situando-se no nível 2. *Representatividade* (4) — refere-se a dados de apenas uma prática de disposição representativa (aterro de resíduos inertes), comparável ao caso brasileiro, mas sem cobrir a diversidade de instalações, caracterizando nível 4. *Correlação temporal* (1) — inventário atualizado na versão 3.10, menos de 3 anos da referência. *Correlação geográfica* (2) — o processo é modelado a partir do contexto europeu/global, o que difere parcialmente da realidade nacional. *Correlação técnica* (3) — refere-se a aterros genéricos de resíduos inertes, não necessariamente equivalentes às especificidades técnicas de operação em aterros brasileiros.

Observa-se que os dados relacionados à produção de gás de síntese obtiveram a melhor classificação (nível alto), em razão da sua coleta direta durante testes em escala piloto. Essa abordagem proporcionou elevada representatividade temporal, geográfica e técnica. Por outro lado, os dados relativos ao uso de gás natural e à disposição em aterro foram obtidos a partir do banco de dados *Ecoinvent* v3.10, o que justifica a classificação de qualidade média, especialmente pelas limitações de representatividade regional e especificidade tecnológica.

Limitações do estudo

Apesar dos resultados consistentes e promissores, é importante destacar algumas limitações do estudo. A primeira refere-se à heterogeneidade intrínseca do *fluff*, cuja composição pode variar significativamente entre diferentes lotes, origens geográficas ou fornecedores. Como consequência, os resultados ambientais da gaseificação poderão apresentar variações futuras, especialmente nas categorias relacionadas à toxicidade e às emissões atmosféricas, sendo recomendada a replicação de testes para aprimorar a robustez das estimativas.

Adicionalmente, este estudo está limitado a uma unidade siderúrgica específica no Brasil, com condições operacionais, matriz elétrica e distâncias logísticas particulares. Dessa forma, os resultados não podem ser generalizados automaticamente para outras unidades industriais sem uma análise contextualizada.

Outro ponto importante está relacionado ao escopo de monitoramento de emissões atmosféricas. Durante os testes piloto, foram monitorados diretamente apenas os compostos

HCl e Cl₂, além da estimativa de CO₂ no gás considerando a combustão completa a partir da caracterização do gás de síntese. A medição de outros parâmetros relevantes, como material particulado (MP), NO_x e dioxinas/furanos (PCDD/Fs), não foi realizada devido a problemas logísticos: em função de atrasos no cronograma do teste piloto, a empresa contratada para o monitoramento não conseguiu adequar sua agenda para a realização completa da campanha de amostragem.

No contexto da formação de poluentes orgânicos persistentes, como dioxinas e furanos (PCDD/Fs), destaca-se que tais compostos não são gerados em condições típicas de gaseificação, pois o processo ocorre em temperaturas elevadas (>800°C) e em atmosfera redutora, o que inibe a recombinação de precursores clorados e aromáticos. Entretanto, a síntese de novo de PCDD/Fs pode ocorrer durante o resfriamento do gás, especialmente quando os fluxos passam de forma lenta pela chamada "janela de formação" (200–450°C), na presença de partículas carbonosas e metais que atuam como catalisadores. Esse risco é significativamente reduzido quando o resfriamento é rápido, minimizando o tempo de residência na faixa crítica de temperatura (MANENTE et al., 2022). No presente estudo, apesar de não ter sido realizado o monitoramento direto de PCDD/Fs devido a limitações operacionais, as condições de operação empregadas (altas temperaturas e atmosfera redutora) e a caracterização do teor de cloro no *fluff* conferem elevada confiabilidade quanto à baixa probabilidade de formação desses compostos.

Por fim, destaca-se que, mesmo com essas limitações, o estudo oferece uma contribuição relevante ao demonstrar os benefícios ambientais da substituição do gás natural por um combustível derivado de resíduo industrial, alinhando-se a estratégias de descarbonização e economia circular. A geração de dados primários em escala piloto aumenta a confiabilidade da modelagem e permite que os resultados sirvam como base técnica para futuras decisões de investimento em tecnologias sustentáveis para o setor siderúrgico.

5.2.7 Inventário de Gases de Efeito Estufa

A Tabela 14 apresenta o comparativo das emissões de gases de efeito estufa para os dois cenários avaliados: uso exclusivo de gás natural (cenário atual) e substituição parcial por gás de síntese a partir do *fluff*.

Tabela 14 – Resumo das emissões totais de GEE para os dois cenários avaliados.

Escopo	Categoria	Gás Natural (tCO ₂ e)	Gás de Síntese (tCO ₂ e)
Escopo 1	Emissões diretas (combustão)	97.472,81	96.849,18
Escopo 2	Energia elétrica (localização)	29.376,45	29.376,45
Escopo 3	Resíduos e outras fontes indiretas	226.469,52	221.872,70
Total Geral		353.318,78	348.098,33

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Com base nos resultados, observa-se que o cenário com gás de síntese apresenta uma redução nas emissões totais de GEE, com uma diferença de aproximadamente 5.220,45 tCO₂e, o que representa uma diminuição de cerca de 1,48% em relação ao cenário de referência.

Essa redução é distribuída entre os escopos 1 e 3. No escopo 1, as emissões diretas relacionadas à queima de combustíveis diminuem ligeiramente devido ao menor fator de emissão associado ao gás de síntese devido ao conteúdo biogênico. No escopo 3, a principal contribuição para a redução está na eliminação das emissões associadas à disposição do *fluff* em aterro, uma vez que o resíduo passa a ser valorizado energeticamente. O escopo 2 permanece inalterado, uma vez que o consumo de energia elétrica da unidade não é afetado pela substituição do combustível térmico no forno de laminação, considerando que a energia consumida no processo de gaseificação será de origem renovável (parque eólico).

Embora com metodologia distinta, (YOO et al., 2022) também abordaram os impactos em emissões de GEE ao comparar a gaseificação com fusão ao processo convencional de incineração de ASR. Apesar da gaseificação apresentar maiores emissões brutas de GEE devido ao uso intensivo de eletricidade nos fornos de fusão, os autores destacam que o gás gerado apresenta maior pureza de CO₂, o que favorece estratégias futuras de captura e armazenamento de carbono (CCS). Tal perspectiva indica que, quando integrada a tecnologias complementares, a gaseificação pode se tornar competitiva e ambientalmente vantajosa em termos de mitigação climática.

No contexto do presente trabalho, o uso de energia renovável para alimentar a planta de oxigênio e a preparação do *fluff* em CDRI reforça esse potencial de sustentabilidade, mitigando significativamente os impactos das emissões indiretas oriundas do uso da eletricidade. Assim, ambos os estudos convergem quanto à relevância do aproveitamento energético de resíduos como estratégia viável para redução de emissões de GEE e promoção da economia circular.

Mesmo com uma redução percentual modesta, no âmbito da unidade siderúrgica, os resultados reforçam o papel da valorização energética de resíduos como estratégia complementar

de mitigação de emissões. Além da contribuição à descarbonização, essa alternativa evita emissões fugitivas de metano provenientes do aterro e promove maior circularidade na cadeia produtiva da siderurgia.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram a viabilidade técnica e ambiental da gaseificação do *fluff* para a produção de gás de síntese, desde que sejam adotadas estratégias de controle de emissões que assegurem conformidade regulatória e minimizem os impactos ambientais.

No aspecto técnico, observou-se que a eficiência da gaseificação e a qualidade do gás produzido estão fortemente relacionadas à proporção oxigênio/*fluff* e à temperatura do processo. Os experimentos indicaram que temperaturas mais elevadas, combinadas com uma relação adequada de oxigênio, favorecem a conversão do resíduo em gás com elevado poder calorífico, maximizando seu aproveitamento energético. Os testes piloto confirmaram a viabilidade técnica da gaseificação, com rendimento específico de gás da ordem de 1,02 Nm³/kg de *fluff*. A composição média do gás gerado foi de 71,5% de CH₄, 14,8% de CO₂ e 3,65% de CO, com poder calorífico inferior estimado em 28,79 MJ/Nm³. Apesar da predominância de metano, em contraste com outros estudos da literatura nos quais CO e H₂ são majoritários, o gás gerado mostrou potencial energético elevado e estabilidade suficiente para operação contínua.

As emissões de compostos clorados monitoradas durante os testes, como cloro gasoso (Cl₂) e ácido clorídrico (HCl), permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela CETESB. As concentrações de HCl na saída do lavador variaram entre 4,14 mg/Nm³ e 4,18 mg/Nm³, valores abaixo do limite máximo permitido de 10,00 mg/Nm³ conforme estabelecido na Decisão de Diretoria CETESB nº 326/2014/I. As cinzas geradas foram classificadas como resíduo Classe IIA (não inerte), apresentando composição compatível com possíveis rotas de coprocessamento industrial.

Do ponto de vista ambiental, a ACV mostrou que o gás de síntese apresenta menor impacto em quase todas as categorias de impacto quando comparado ao gás natural. A valorização energética do *fluff* também evita os impactos associados à sua disposição em aterros, contribuindo para a eliminação dos impactos ambientais associados a essa destinação de metano e aumento da circularidade nos processos siderúrgicos.

Os resultados indicaram que o gás de síntese do *fluff* apresentou melhor desempenho ambiental na maioria das categorias de impacto avaliadas quando comparado ao gás natural. Com destaque para redução de 26% na categoria de aquecimento global e 100% na categoria de escassez de recursos fósseis. A única categoria em que o cenário de gaseificação apresentou impacto superior foi o consumo de água, devido ao uso de oxigênio industrial, cuja produção é

intensiva nesse recurso.

Além disso, o inventário de GEE indicou uma redução de emissões com a substituição parcial do gás natural por gás de síntese, reforçando o potencial da alternativa como ferramenta para a descarbonização da indústria. A produção anual estimada de gás de síntese foi de aproximadamente 20,6 milhões Nm³, a partir de 20,2 milhões kg de *fluff*, que tem potencial para substituir energeticamente cerca de 16,5 milhões Nm³ de gás natural. Esse volume corresponde a 72% do consumo anual do forno de laminação em 2024 (23,04 milhões Nm³). Essa substituição parcial do gás natural por gás de síntese permitirá uma economia potencial de aproximadamente 5.220,45 toneladas de CO₂ equivalente por ano.

A integração dessa rota tecnológica pode representar um avanço relevante na agenda de sustentabilidade da siderurgia, alinhando ganhos ambientais, aproveitamento de resíduos e redução da dependência de combustíveis fósseis. Os resultados deste trabalho oferecem subsídios para decisões estratégicas e investimentos futuros, recomendando-se a continuidade de pesquisas em escala industrial e o aprofundamento da análise econômica da implementação do sistema.

Referências

- ABNT NBR ISO 10004. **Resíduos sólidos — Classificação**. Rio de Janeiro, 2024.
- ABNT NBR ISO 14040. **Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2025.
- ABNT NBR ISO 14044. **Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT NBR ISO 14064. **Gases de efeito estufa — Especificação com orientação para a quantificação, monitoramento e relato de emissões e remoções de GEE em nível organizacional**. Rio de Janeiro, 2018.
- AGÊNCIA SENADO. **Protocolo de Kyoto**. 2022. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/protocolo-de-kyoto>>. Acesso em: 13 out. 2022.
- ARCELORMITTAL BRASIL. **Catálogo de coprodutos – Público externo**. 2021. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos>>. Acesso em: 21 nov. 2023.
- ARCELORMITTAL BRASIL. **Climate Action Report 2**. 2021. Acesso em: 20 out. 2023. Disponível em: <<https://corporate.arcelormittal.com/sustainability/climate-action-reports#>https://corporate.arcelormittal.com/sustainability/climate-action-reports#>>.
- BA-SHAMMAKH, M. S. Cost minimization with optimal co₂ mitigation options for the steelmaking industry. **Energy & Fuels**, v. 33, n. 11, p. 11439–11445, 2019.
- BATISTA, D. **Classificação e caracterização do beneficiamento da sucata de ferro e aço utilizada no processo siderúrgico para identificação de viabilidade de aplicações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Universidade de São Paulo, 2014.
- BOLDRI, A. et al. **Life Cycle Assessment of Shredder Residue Management**. Copenhagen, Denmark: The Danish Environmental Protection Agency, 2015. Disponível em: <<https://www.mst.dk/english>>. Acesso em: 14 ago. 2025. ISBN 978-87-93435-11-7.
- BRASIL. **LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022. INSTITUI O MARCO LEGAL DA MICROGERAÇÃO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA E O SISTEMA DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. 2022. Disponível em: <<https://www.planalto.gov.br/ccivil03/Ato2022-2023/2022/Lei/L14300.htm>>. Acesso em: 05 fev. 2025.
- BRASIL. **DECRETO Nº 11.123, DE 18 DE OUTUBRO DE 2024. REGULAMENTA DISPOSIÇÕES DA LEGISLAÇÃO FEDERAL RELACIONADAS À ENERGIA E SUSTENTABILIDADE**. 2024. Disponível em: <<https://www.planalto.gov.br/ccivil03/Ato2024-2025/2024/Decreto/D11123.htm>>. Acesso em: 05 fev. 2025.
- CAESAR, L. et al. **PLANETARY HEALTH CHECK 2024: A SCIENTIFIC ASSESSMENT OF THE STATE OF THE PLANET**. Potsdam: Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2024. Acesso em: 07 dez. 2024. Disponível em: <<https://www.planetaryhealthcheck.org/>>.

CARBON, W. **8 motivos para fazer seu inventário de carbono com o Climas**. 2022. Acesso em: 10 nov. 2023. Disponível em: <<https://blog.waycarbon.com/2023/11/08-motivos-para-fazer-seu-inventario-de-carbono-com-o-climas/>><https://blog.waycarbon.com/2023/11/08-motivos-para-fazer-seu-inventario-de-carbono-com-o-climas/>.

CETESB L9.224. **L9.224: Determinação da umidade dos efluentes**. São Paulo, 2021. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

CIACCI, L. et al. A comparison among different automotive shredder residue treatment processes. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, p. 896–906, 2010.

CIRCLE ECONOMY. **CGR Global 2023 - Economia Circular**. Amsterdam: Circle Economy, 2023. Acesso em: 07 dez. 2024. Disponível em: <<https://www.circularity-gap.world/>><https://www.circularity-gap.world/>.

COMISSÃO EUROPEIA. **Environmental footprint methods**. 2024. Acesso em: 15 dez. 2024. Disponível em: <https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods_en>https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods_en.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **Decisão de Diretoria CETESB nº 326/2014/I, de 9 de dezembro de 2014**. 2014. Diário Oficial do Estado de São Paulo. Estabelece valores orientadores e procedimentos para avaliação de emissões atmosféricas provenientes da queima de combustíveis alternativos e resíduos em fornos industriais. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br>><https://cetesb.sp.gov.br>.

CRUZ, T. T. d. **Avaliação exergetica do ciclo de vida de um ciclo combinado a gás natural com sistema de oxicombustão**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, SP, Brasil, 2020.

DANISH ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Life cycle assessment of fluff waste treatment: incineration, landfilling and co-processing in cement kilns**. 2015. Disponível em: <<https://mst.dk>>. Acesso em: jul. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards a circular economy: business rationale for an accelerated transition**. [S.l.]: Ellen MacArthur Foundation, 2015. Disponível em: <<https://ellenmacarthurfoundation.org/>>. Acesso em: 07 dez. 2024.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Climate and a circular economy**. 2024. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/climate/overview>>. Acesso em: 08 dez. 2024.

EPA 026. **Method 026: Determination of Hydrogen Halide and Halogen Emissions from Stationary Sources (Non-Isokinetic)**. Washington, D.C., 1998. Determinação de emissões de ácido clorídrico e halogênios a partir de fontes estacionárias não-isocinéticas.

EPA 030. **Method 30: Volatile Organic Sampling Train (VOST)**. Washington, D.C., 1999. Amostragem de compostos orgânicos voláteis.

EUROPEAN COMMISSION. **ILCD handbook: framework and requirements for LCIA models and indicators**. 1. ed. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2010.

EUROPEAN COMMISSION. **ILCD handbook: general guide for life cycle assessment - detailed guidance**. 1. ed. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2010. 417 p. ISBN 978-92-79-15519-5.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Biblioteca digital: especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol**. 2023. Acesso em: 20 jul. 2023. Disponível em: <<https://fgv.br>><https://fgv.br>.

GHG PROTOCOL. **Corporate value chain accounting and reporting standard (Scope 3)**. 2023. Acesso em: 24 jul. 2023. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2-.pdf>https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2-.pdf.

GHG PROTOCOL BRASIL. **O Programa Brasileiro GHG Protocol**. 2022. Acesso em: 10 nov. 2023. Disponível em: <<http://ferramenta.ghgprotocolbrasil.com.br/index.php?r=site/conteudo&id=1>><http://ferramenta.ghgprotocolbrasil.com.br/index.php?r=site/conteudo&id=1>.

HAUSCHILD M.; JESWIET, J. A. L. **From life cycle assessment to sustainable production: status and perspectives**. [S.l.], 2005.

HEYDENRYCH, B. **Lesson 6: life cycle thinking in business decision making**. 2024. Disponível em: <<https://www.learnlifecycle.com/courses/take/life-cycle-thinking-in-business-decision-making/pdfs/7418301-lesson-6>>. Acesso em: 19 out. 2024.

INGEMARSDOTTER EMILIA E DUMONT, M. **The circular economy and LCA make each other stronger**. [S.l.]: Pre-Sustainability, 2022. Disponível em: <<https://pre-sustainability.com/articles/the-circular-economy-and-lca-make-each-other-stronger/>>. Acesso em: 08 dez. 2024.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário estatístico da indústria do aço brasileira – 2024**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2024. Acesso em: 11 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.acobrasil.org.br>><https://www.acobrasil.org.br>.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aço novo de novo: recicle para cuidar do meio ambiente**. [S.l.]: Instituto Aço Brasil, 2025.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **História da siderurgia no Brasil**. 2025. Acesso em: 11 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.acobrasil.org.br>><https://www.acobrasil.org.br>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Greenhouse gas emissions from energy: highlights**. 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/greenhouse-gas-emissions-from-energy>>. Acesso em: 19 jun. 2025.

JOLLIET, O. et al. **Environmental life cycle assessment**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.

LIFE CYCLE INITIATIVE. **Benefits of life cycle approaches**. 2024. Acesso em: 20 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.lifecycleinitiative.org/starting-life-cycle-thinking/benefits/>><https://www.lifecycleinitiative.org/starting-life-cycle-thinking/benefits/>.

MANCINI, G.; TAMMA, R.; VIOTTI, P. Thermal process of fluff: preliminary tests on a full-scale treatment plant. **Waste Management**, v. 30, n. 8-9, p. 1670–1682, 2010.

MANENTE, G. et al. The pyrolysis and gasification pathways of automotive shredder residue targeting the production of fuels and chemicals. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2385, p. 012003, 2022.

MARIC, J. et al. Valorization of automobile shredder residue using indirect gasification. **Energy & Fuels**, v. 32, n. 12, p. 12795–12804, 2018.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de impacto do ciclo de vida: revisão dos principais métodos. **Production**, ABEPRO, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 160–175, jan./mar. 2016.

MONDAL, P.; DANG, G. S.; GARG, M. O. Syngas production through gasification and cleanup for downstream applications—recent developments. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 8, p. 1395–1410, 2011.

NETWORK, G. F. **Past Earth overshoot days**. 2024. Acesso em: 20 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.overshootday.org/newsroom/past-earth-overshoot-days/>><https://www.overshootday.org/newsroom/past-earth-overshoot-days/>.

OMETTO, A. R.; SARKIS, J.; EVANS, S. (Ed.). **A systemic transition to circular economy: business and technology perspectives**. Cham: Springer International Publishing, 2024. v. 12. (Greening of Industry Networks Studies, v. 12).

ORMAZABAL, M.; JACA, C.; PUGA-LEAL, R. Analysis and comparison of life cycle assessment and carbon footprint software. In: **Advances in Intelligent Systems and Computing**. Cham: Springer, 2014. p. 131–140. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-55122-2_131>https://doi.org/10.1007/978-3-642-55122-2_131.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL PARA A MUDANÇA DE CLIMA [IPCC]. **Sexto Relatório de Avaliação do IPCC**. 2022. Acesso em: 13 out. 2022. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>><https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.

PROQR. **Combustíveis alternativos sem impactos climáticos: cooperação técnica Brasil-Alemanha para o desenvolvimento sustentável**. 2021.

REDE ACV. **Avaliação do ciclo de vida: princípios e práticas**. 2024. Acesso em: 07 dez. 2024. Disponível em: <<https://redeacv.org.br/files/a219af2416a410e5843e4947d19af2e3-.pdf>><https://redeacv.org.br/files/a219af2416a410e5843e4947d19af2e3-.pdf>.

RESPONSIBLE STEEL. **SteelZero**. 2022. Acesso em: 20 set. 2023. Disponível em: <<https://www.responsiblesteel.org/about/steelzero/>><https://www.responsiblesteel.org/about/steelzero/>.

RIBEIRO, L. S. et al. Reuse of steel residue in polypropylene matrices for the production of plastic wood, aiming at decarbonization. **Sustainability**, v. 16, n. 4505, p. 1–18, 2024.

RODRIGUES, T. O. et al. **Guia Qualidata: requisitos de qualidade de conjuntos de dados para o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida**. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), 2016. ISBN 978-85-7013-119-5.

SCHMITZ, N. et al. Towards co2-neutral process heat generation for continuous reheating furnaces in steel hot rolling mills—a case study. **Energy**, v. 224, p. 120155, 2021.

Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SIMA). **Resolução SIMA nº 47, de 7 de agosto de 2020**. 2020. Diário Oficial do Estado de São Paulo. Estabelece diretrizes e critérios para o uso de Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR e

CDRI) em processos industriais no Estado de São Paulo. Disponível em: <<https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2020/08/Resolu%C3%A7%C3%A3o-SIMA-47-2020-CDR-.pdf>><https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2020/08/Resolu%C3%A7%C3%A3o-SIMA-47-2020-CDR-.pdf>.

Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA). **Resolução SMA nº 79, de 4 de novembro de 2009**. 2009. Diário Oficial do Estado de São Paulo. Dispõe sobre padrões e condições para emissão de poluentes atmosféricos provenientes de fontes fixas no Estado de São Paulo. Disponível em: <<https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2009/11/Resolu%C3%A7%C3%A3o-SMA-79-2009-.pdf>><https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2009/11/Resolu%C3%A7%C3%A3o-SMA-79-2009-.pdf>.

SICV BRASIL. **Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida**. 2024. Acesso em: 30 dez. 2024. Disponível em: <<https://sicv.acv.ibict.br/>><https://sicv.acv.ibict.br/>.

STANICIC, I. et al. Fate of lead, copper, zinc and antimony during chemical looping gasification of automotive shredder residue. **Fuel**, Elsevier, v. 302, p. 121147, 2021.

UNEP. **Life Cycle Initiative Progress Report 2023**. [S.l.]: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2023. Disponível em: Journal Articles - Life Cycle Initiative.

VERMAAS, D. A.; GIESEN, C. V. D.; RAMIREZ, A. Life cycle assessment to evaluate the environmental impact of alternative fuels in industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120589, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120589>><https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120589>.

WEIDEMA, B. P.; WESNAES, M. S. Data quality management for life cycle inventories—an example for using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3–4, p. 167–174, 1996.

WERNET, G. et al. The ecoinvent database version 3 (part i): overview and methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 9, p. 1218–1230, 2016.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Sustainable steel at the core of a green economy**. Bruxelas: World Steel Association, 2023. Acesso em: 11 jan. 2025. Disponível em: <<https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainable-steel-at-the-core-of-a-green-economy-.pdf>><https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainable-steel-at-the-core-of-a-green-economy-.pdf>.

WRI Brasil. **4 gráficos para entender as emissões de gases de efeito estufa por país e por setor**. 2021. Acesso em: 12 mai. 2021. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt-/blog/2020/02/quatro-graficos-explicam-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-por-pais-e-por-setor>><https://wribrasil.org.br/pt-/blog/2020/02/quatro-graficos-explicam-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-por-pais-e-por-setor>.

WWF. **Acordo de Paris completa cinco anos com lições aprendidas**. 2022. Acesso em: 13 out. 2022. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?77471/Acordo-de-Paris-completa-cinco-anos-com-lico-es-aprendidas>><https://www.wwf.org.br/?77471/Acordo-de-Paris-completa-cinco-anos-com-lico-es-aprendidas>.

YANG K.; ZHU, N. Y. T. Análise da escala ótima do sistema de resfriamento, aquecimento e energia combinados (cchp) baseado na gaseificação de biomassa. **Procedia Engineering**, v. 205, p. 145–152, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.050>><https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.050>.

YOO, H. et al. Evaluation of the melting gasification process for recovery of energy and resources from automobile shredder residues. **Energies**, v. 15, n. 3, 2022.