LUCIANA DIMAS CAMILLO

Proposição de Melhorias do Desempenho Ambiental do Processo de Produção do Aço Líquido

SÃO PAULO
2016

LUCIANA DIMAS CAMILLO

Proposição de Melhorias do Desempenho Ambiental do Processo de Produção do Aço Líquido

Dissertação apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências

SÃO PAULO

2016

LUCIANA DIMAS CAMILLO

Proposição de Melhorias do Desempenho Ambiental do Processo de Produção do Aço Líquido

Dissertação apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr.
Luiz Alexandre Kulay

SÃO PAULO

2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

Camillo, Luciana Dimas
Proposição de Melhorias do Desempenho Ambiental do Processo de Produção do Aço Líquido / L. D. Camillo -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
130 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Ciclo de vida (avaliação) 2.Processos químicos 3.Aço Líquido (Produção; Aspectos ambientais) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

Aos meus pais, que sempre suportam a distância
em prol do meu crescimento. A vocês dedico
mais uma vitória em minha vida.

Aos meus sogros, por todo amor,
carinho, companhia e paciência.

Ao meu grande e eterno amor , Leonardo,
que nos momentos mais difíceis me
incentivou, apoiou e jamais me
deixou desistir de mais um sonho.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer àquele que tornou tudo isso possível, ao mestre Luiz Alexandre Kulay. Sem seu apoio, dedicação e confiança nada disso seria possível.

Ao meu eterno e grande amor, Leonardo, que fez tudo isso acontecer. A você que suportou pacientemente minha ausência e cansaço. Você que foi minha razão e segurou forte a minha mão para juntos trilharmos esse caminho. Obrigada por não deixar que tudo isso não passasse apenas de um sonho. Essa vitória também é sua!

Aos meus amados pais e irmão, Miriam, Eugênio e Rafael, que sempre me ensinaram o verdadeiro valor do "aprender sempre", agradeço a confiança e amor que sempre me deram! De vocês retirei toda a determinação para seguir em frente em mais um desafio.

Aos meus sogros, Lili e Luizão, que foram meus guardiões durante toda essa caminhada com muita paciência e amparo. A vocês, meus pais de coração, dedico mais essa vitória.

Aos meus demais familiares que sempre acreditaram no meu potencial!

Aos amigos queridos que me escutaram horas a fio, entre lamentos e parágrafos escritos, informações soltas e sem sentido para a maioria, vocês foram meu grande amparo!

Aos colegas de trabalho, por toda cooperação, compreensão e auxílio! Obrigada pelas diversas vezes que esclareceram minhas dúvidas, disponibilizaram o seu tempo para me ajudar e por principalmente confiar em meu potencial, e dessa forma compreenderem e admitirem minhas ausências.

“Plante seu jardim e decore sua alma,
ao invés de esperar que alguém lhe traga flores.
E você aprende que realmente pode suportar,
que realmente é forte,
e que pode ir muito mais longe
depois de pensar que não se pode mais.”

William Shakespeare

RESUMO

O aço é um insumo de usos diversos que variam desde a construção civil, até a confecção de bens de consumo. Sob a perspectiva ambiental, as transformações que ocorrem nessa cadeia produtiva se destacam pelos elevados consumos de insumos e de energia – nas formas elétrica e térmica –, e por emissões para o Meio Ambiente. Assim, o grande desafio das siderúrgicas é encontrar alternativas que reduzam os impactos ambientais associados aos seus processos. Esta busca requer porém, uma análise sistêmica e integrada que considere o produto final em todo seu ciclo de vida. Este estudo tem por finalidade a avaliação do desempenho ambiental da produção de aço líquido para um arranjo tecnológico médio no país. Para tanto, utilizou-se a ferramenta de Análise de Ciclo de Vida (ACV). Embora o diagnóstico tenha sido efetuado sobre todas as etapas de processamento, optou-se por evidenciar etapas que fossem inerentes do processamento do aço líquido. O diagnóstico inicial, então, revelou que as principais etapas responsáveis pelos impactos ambientais inerentes ao processo são: a) produção de energia elétrica do Grid brasileiro, b) a manufatura do aço e c) captação e transporte de água. A partir desta vistoria de etapas inerentes pôde-se propor cenários de melhoria de desempenho ambiental para o processo de produção do aço líquido, a saber: I) Aproveitamento de Gás de Aciaria para produção de Energia Elétrica e II) Instalação de Tecnologia de apagamento a seco do coque. Embora o Cenário III não esteja contemplado nas cargas inerentes de processo, o mesmo foi efetuado a partir de solicitação da empresa: III) Substituição do fornecimento de Minério de Manganês. A técnica de ACV foi novamente aplicada com o intuito de verificar a validade das ações propostas. O estudo concluiu que houve melhorias relevantes no desempenho ambiental principalmente nos modelos CED e USEtox, em todas a categorias de impacto apresentadas (Fósseis Não Renováveis, Nuclear Não Renovável, Biomassa Não Renovável, Biomassa Renovável, Energia decorrente de efeitos naturais, Água Renovável, Toxidade Humana a Câncer, Toxidade Humana Não Câncer e Ecotoxidade Aquática) para os Cenário I e II. Pouco impacto foi observado no modelo ReCiPe Midpoint (H) para o Cenário I e II a não ser pela piora na categoria de impacto de Formação de Oxidantes Fotoquímicos para o Cenário II. Isso aconteceu por um aumento na emissão de monóxido de carbono descrito pela proposição. O Cenário III apresentou melhoria significativa apenas de uma categoria de impacto: Depleção de Metais, devido redução da depleção manganês, explicada pela melhoria de qualidade na troca de fornecedores.

Palavras Chave: Aço Líquido, Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), Desempenho Ambiental.

ABSTRACT

Steel is an input for various uses ranging from construction, to the production of consumer goods. From an environmental perspective the changes that occur in the production chain are highlighted by high consumption of raw materials and energy - in electric and thermal forms - and emissions to the environment. So the great challenge of the steel is to find alternatives that reduce environmental impacts associated with their processes. This search, however, requires a systemic and integrated analysis that considers the final product throughout its life cycle. This study aims to evaluate the environmental performance of the liquid steel production to an average technological arrangement in the country. For this, we used the Life Cycle Analysis Tool (ACV). Although the diagnosis has been made on all processing stages, we chose to highlight steps that were inherent in the liquid steel processing. The initial diagnosis then revealed that the main stages responsible for the environmental impacts inherent in the process are: a) electricity production of the Brazilian Grid, b) the manufacture of steel and c) uptake and transport of water. From this survey inherent steps could be proposed improvement scenarios of environmental performance for the liquid steel production process, as follows: I) Steelmaking Gas Utilization for Production of Electricity and II) Coke Dry Quenching Tecnology. Although Scenario III is not contemplated in the process of inherent charges, the same was made on request from the company: III) Replacing the supply of manganese ore. The LCA technique was applied again in order to verify the validity of the proposed actions. The study concluded there were significant improvements in the environmental performance mainly in CED and USEtox models in all the presented impact categories (Fossils Renewable Not Nuclear Renewable No Biomass Renewable Non Renewable Biomass Energy from natural effects, Renewable Water, Toxicity Human to Cancer, Human Toxicity Ecotoxicity not Cancer and Frashwater Ecotoxity) for Scenario I and II. Little impact was observed in the model ReCiPe Midpoint (H) for Scenario I and II unless the worsening Photochemical Oxidant Formation impact category for Scenario II. This happened by an increase in carbon monoxide emission described by the proposition. Scenario III showed significant improvement only in a depletion impact category metals due reducing manganese depletion, explained by the improvement of quality of switching suppliers.

Keywords: Liquid Steel, Life Cycle Assessment (LCA), Environmental Performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do processo de produção de aço. 22
Figura 2 - Principais fluxos do processo de coqueificação de carvões. 25
Figura 3 - Esquema simplificado de produção de gusa nos Altos Fornos. 27
Figura 4 - Fases de estudo de ACV. 32
Figura 5 - Sistema de Produto e respectivas fronteiras – Diagnóstico Inicial 47
Figura 6 - Participação percentual de cargas externas e inerentes ao processo nos impactos energéticos – Diagnóstico Inicial 50
Figura 7 - Perfil de impacto ambiental da produção de 1 kg de aço líquido obtido pelo Método CED –Diagnóstico Inicial 52
Figura 8 - Perfil de impacto ambiental apenas da produção em si de 1,0 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial 55
Figura 9 - Participação percentual de cargas externas e inerentes ao processo nos impactos proveniente de emissões da produção de 1,0 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial 56
Figura 10 - Perfil de impacto ambiental decorrentes de emissões da produção de 1 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial 57
Figura 11 - Participação relativa de cargas externas e inerentes ao processo nos impactos decorrentes de emissões – Diagnóstico Inicial 57
Figura 12 - Perfil de impacto ambiental referente a Ecotoxicidade e Toxicidade Humana decorrentes de emissões da produção de 1 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial 58
Figura 13 - Perfil de impacto ambiental derivados de emissões associadas a etapas inerentes a produção de 1 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial 63
Figura 14 - Perfil de impacto ambiental em termos de Toxicidades decorrente de cargas inerentes à produção de 1 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial 63
Figura 15 - Configuração e fluxos para o reaproveito proposto de Gás de Aciaria. 75
Figura 16 - Figura esquemática do apagamento a seco do coque 78
Figura 17 - Esquema utilizado para dimensionamento dos fluxos de processo para 1,0 t de coque. 79
Figura 18 - Sistema de Produto e respectivas fronteiras – Cenário I 86
Figura 19 - Comparação de perfis ambientais da produção de Aço Líquido Cenário I vs Cenário Base – Cargas totais 89

Figura 20 - Comparação de perfis ambientais da produção de Aço Líquido: Cenário Base vs Cenário I – etapas inerentes ao processo 91
Figura 21 - Perfil de impacto ambiental de cargas inerentes em termos de PED para a produção de 1 kg aço – Cenário I 92
Figura 22 - Perfil de impacto ambiental decorrentes de emissões inerentes a produção de 1,0 kg de aço líquido – Cenário I. 94
Figura 23 - Perfil de impacto ambiental de cargas inerentes para a produção de 1 kg de aço líquido em termos de toxicidade – Cenário I. 96
Figura 24 - Sistema de Produto e respectivas fronteiras – Cenário II 99
Figura 25 - Comparação de perfis ambientais da produção de Aço Líquido Cenário II vs Cenário Base – cargas totais do processo 103
Figura 26 - Comparação de perfis ambientais da produção de Aço Líquido: 103
Figura 27 - Perfil de impacto ambiental de cargas inerentes em termos de PED para a produção de 1 kg aço – Cenário II. 104
Figura 28 - Perfil de impacto ambiental decorrentes de emissões inerentes a produção de 1,0 kg de aço líquido – Cenário II 106
Figura 29 - Perfil de impacto ambiental de cargas inerentes para a produção de 1 kg de aço líquido em termos de toxicidade – Cenário II. 108
Figura 30 - Sistema de Produto e respectivas fronteiras – Cenário III 110
Figura 31 - Comparação de perfis ambientais da produção de Aço Líquido Cenário III vs Cenário Base – cargas totais do processo 113
Figura 32 Perfil de impacto ambiental em termos de PED para a produção de 1 kg aço – Cenário III. 114
Figura 33 - Perfil de impacto ambiental da produção de 1,0 kg de aço líquido – Cenário III. 116
Figura 34 - Perfil de impacto ambiental para produção de 1 kg de aço líquido em termos de toxicidade – Cenário III. 117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ranking dos principais produtores mundiais. 19
Tabela 2 - Inventário simplificado da produção de 1,0 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial. 48
Tabela 3 - Avaliação de desempenho da produção de aço líquido em termos de Demanda de Energia Primária (PED) – Diagnóstico Inicial 51
Tabela 4 - Avaliação de desempenho da produção de aço líquido em termos de Demanda de Energia Primária (PED) para Cargas Inerentes – Diagnóstico Inicial 54
Tabela 5 - Perfil de Impactos Ambientais decorrentes de emissões da produção de 1,0 kg aço líquido 55
Tabela 6 - Perfil de Impactos Ambientais da produção de 1,0 kg aço líquido para etapas inerentes ao processo 62
Tabela 7 – Contribuições unitárias de massa e preço para aço líquido, e escórias de Altos Fornos e Aciaria 66
Tabela 8 – Critérios empregados para alocação mássica e de valor econômico. 67
Tabela 9 – Efeito da aplicação de diferentes métodos para tratamento de multifuncionalidade aos perfis de impacto energético e derivado de emissões da produção de aço líquido. 67
Tabela 10 - Hierarquização dos efeitos adversos da produção de aço líquido para cada categoria de impacto e aspecto ambientais avaliados 70
Tabela 11 - Perfil de Impactos Ambientais da produção de 1,0 kg aço líquido de Cargas Externas vs Cargas Inerentes 72
Tabela 12 - Características de entrada e saída de matérias-primas do sistema. 76
Tabela 13 - Comparação das emissões de CO e CO_2 entre disgnóstico base e cenário proposto para a análise das emissões das caldeiras. 77
Tabela 14 - Composição química relativa aos gases de alívio da Câmara de Apagamento do coque. 80
Tabela 15 - Capacidade calorífica e entalpia específica calculados para o coque. 81
Tabela 16 - Participação percentual dos fornecedores de minério fino de manganês para efeito de consumo na Sinterização 82
Tabela 17 - Consumo específico dos materiais para produção de 1,0 t sinter com a utilização de 100 % de minério de manganês C. 83

Tabela 18 - Inventário simplificado da produção de 1,0 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial vs. Cenário I. 87
Tabela 19 – Comparação entre Perfis de Impactos Ambientais da produção de 1,0 kg aço líquido para todas as categorias de impacto avaliadas – cargas totais do processo 89
Tabela 20 - Comparação entre Perfis de Impactos Ambientais da produção de 1,0 kg aço líquido para todas as categorias de impacto avaliadas – etapas inerentes ao processo 90
Tabela 21 - Avaliação de desempenho da produção de aço líquido em termos de Demanda de Energia Primária (PED) Cenário I – Cargas Inerentes – tratamento de multifuncionalidades por *Surplus Method.* 93
Tabela 22 - Avaliação de desempenho da produção de aço líquido em termos de Demanda de Energia Primária (PED) Cenário I – Cargas Inerentes - tratamento de multifuncionalidades por alocação mássica. 93
Tabela 23 - Inventário simplificado da produção de 1,0 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial vs. Cenário II. 100
Tabela 24 - Comparação entre Perfis de Impactos Ambientais da produção de 1,0 kg aço líquido para todas as categorias de impacto avaliadas – cargas totais do processo 101
Tabela 25 - Comparação entre Perfis de Impactos Ambientais da produção de 1,0 kg aço líquido para todas as categorias de impacto avaliadas – etapas inerentes ao processo 102
Tabela 26 - Avaliação de desempenho da produção de aço líquido em termos de Demanda de Energia Primária (PED) Cenário II – Cargas Inerentes – tratamento de multifuncionalidades por *Surplus Method* 105
Tabela 27 - Avaliação de desempenho da produção de aço líquido em termos de Demanda de Energia Primária (PED) Cenário II – Cargas Inerentes – tratamento de multifuncionalidades por alocação mássica 105
Tabela 28 - Inventário simplificado da produção de 1,0 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial vs. Cenário III. 111
Tabela 29 - Perfil de Impactos Ambientais da produção de 1,0 kg aço líquido do Cenário III para Cargas Totais – CED, ReCiPe Midpont (H) e USEtox. 112
Tabela 30 - Avaliação de desempenho energético da produção de aço líquido em termos de PED: Cenário III – Surplus Method e Alocação Mássica 115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
ACCV	Avaliação de Custo de Ciclo de Vida
ACV	Análise de Ciclo de Vida
ACVS	Avaliação de Ciclo de Vida Social
AICV	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASCV	Avaliação de Sustentabilidade do Ciclo de Vida
BATs	Best Available Technologies
BEN	Balanço Energético Nacional
BOF	Basic Oxigen Furnace
CC	Mudança Climática
CCS	Carbon Capture and Storage
CDQ	Coke Dry Quenching
CED	Cumulative Energy Demand
CIS	Comunidade dos Estados Independentes
CTUh	Comparative Toxic Unit for human
CVP	Coque Verde de Petróleo
EAF	Eletric Arc Furnace
EBITDA	Earning Before Interests, Taxes, Depreciation and Amortization
FEC	Ecotoxicidade Aquática
FI	Fator de Impacto
FR	Fluxo de Referência
GAC	Gás de Aciaria
GAF	Gás de Alto Forno
GCO	Gás de Coqueria
GEE	Gases de Efeito Estufa
HTc	Toxicidade Humana Câncer
HTnc	Toxicidade Humana Não Câncer
IABr	Instituto Aço Brasil
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
ITs	Innovative Technologies

LCA	Life Cycle Assessment
MD	Depleção de Metal
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NAFTA	North American Free Trade Agreement
NMVOC	Compostos Orgânicos Voláteis que Não o Metano
NRB	Biomassa Não Renovável
NRF	Fósseis Não Renováveis
NRN	Nuclear Não Renovável
OHF	Open Hearth Furnace
PED	Primary Energy Demand
PIB	Produto Interno Bruto
POF	Formação de Oxidantes Fotoquímicos
POP's	Poluentes Organicos Persistentes
RB	Biomassa Renovável
RW	Água Renovável
RWSG	Vento, Sol e Geotermia
TA	Acidificação Terrestre
TCDD	2,3,7,8-tetraclorodibenzeno-p-dioxina
TIR	Taxas Internas de Retorno
TMA	Taxas Mínimas de Atratividade
ULCORED	Ultra Low Carbon Dioxide with Direct Reduction
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
VC	Volume de Controle
WD	Depleção de Água

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 15
2. OBJETIVOS GERAIS E COMPLEMENTARES 17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
3.1. O Processo do Aço 18
3.1.1 Panorama Atual do Mercado Produtor de Aço 18
3.1.2 Processo de produção do Aço 21
3.1.2.1 Sinterizações/Pelotizações 22
3.1.2.2 Manuseio de Carvão/Coqueria 24
3.1.2.3 Altos Fornos 26
3.1.2.4. Aciaria e Laminações 28
3.1.3. Aspectos Ambientais associados ao Processamento do Aço 29
3.2. Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) 31
3.2.1 Conceitos, Usos e Aplicações, Características Metodológicas 31
3.2.2. Estudos de Avaliação Ambiental do Aço 35
4. MÉTODO DE TRABALHO 40
5. DIAGNÓSTICO DE DESEMPENHO DA PRODUÇÃO DE AÇO LÍQUIDO 43
5.1 Definição de Objetivo e Escopo 43
5.1.1 Definição de Objetivo 43
5.1.2 Definição de Escopo 43
5.3 Resultados e Discussão - Diagnóstico Inicial 49
5.3.1 Demanda Primária de Energia (PED) - Diagnóstico Inicial 50
5.3.2. Impactos Ambientais Decorrentes de Emissões - Diagnóstico Inicial 55
5.3.3. Análise de Sensibilidade da Multifuncionalidade 65
6. IDENTIFICAÇÃO DE FOCOS DE IMPACTOS 69
7. SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE MELHORIA 71
8. DIMENSIONAMENTO DAS SOLUÇÕES 75
8.1. Cenário I: Reaproveitamento de Gás de Aciaria para Produção de Eletricidade 75
8.2. Cenário II: Implantação do “Coke Dry Quenching” 77
8.3. Cenário III: Subtituição Minério Fino de Manganês 81
9. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DAS SOLUÇÕES 84
9.1 Cenário I - Reaproveitamento do Gás de Aciaria para geração de Energia Elétrica 84
9.1.1 Definição de Objetivo e Escopo 84
9.1.1.1 Definição de Objetivo 84
9.1.1.2 Definição de Escopo 84
9.1.2 Inventário de Ciclo de Vida – Cenário I 87

9.1.3 Resultados e Discussão – Cenário I 88
9.1.3.1 Demanda de Energia Primária (PED) – Cenário I 91
9.1.3.2 Impactos Ambientais Decorrentes das Emissões – Cenário I 94
9.2 Cenário II: Apagamento a Seco do Coque “Coke Dry Quenching (CDQ)” 97
9.2.1 Definição de Objetivo e Escopo 97
9.2.2 Inventário de Ciclo de Vida – Cenário II 100
9.2.3 Resultados e Discussão – Cenário II 101
9.2.3.1 Demanda Primária de Energia – Cenário II 104
9.2.3.2 Impactos Ambientais Decorrentes das Emissões – Cenário II 106
9.3 Cenário III – Fonte Alternativa de Minério de Manganês 109
9.3.1 Definição de Objetivo e Escopo 109
9.3.2 Inventário de Ciclo de Vida – Cenário III 111
9.3.3 Resultados e Discussão – Cenário III 112
9.3.3.1 Demanda Primária de Energia – Cenário III 113
9.3.3.2 Impactos Ambientais Decorrentes das Emissões – Cenário III 116
10. CONCLUSÕES FINAIS 118
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 120
APÊNDICE A – EQUAÇÕES PARA FUNDAMENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE ALOCAÇÃO 128
APÊNDICE B - EQUAÇÕES PARA FUNDAMENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE ECONÔMICA 129
APÊNDICE C – CÁLCULO DE CALORES ESPECÍFICOS 130

1. INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa a nona posição no ranking das maiores economias do mundo, o qual é liderado pela China que ultrapassou os Estados Unidos em 2014 (INTERNATIONAL MONETARY FUND, 2015). Os minerais guardam uma relação estreita com o desenvolvimento de um país a ponto dos assim chamados minerais escassos, essenciais ou críticos serem classificados como reservas estratégicas. A diversidade mineral do território brasileiro permite a produção de setenta e dois tipos de minerais estratégicos, dos quais vinte e seis são de origem metálica. Neste contexto, destaca-se a produção de minério de ferro do qual o Brasil ocupa o terceiro lugar em relação às reservas mundiais (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2015).

O minério de ferro é matéria-prima básica para a fabricação do aço, insumo de usos diversos em muitos segmentos produtivos, com destaque particular para a construção civil. Nesse caso, o aço pode ser empregado em fundações, estruturas e fachadas. A construção em aço representa atualmente cerca de 14 % do universo do setor de edificações. O consumo de aço para estruturas metálicas voltadas para a construção cresceu 6,4 % entre 2012 e 2013 (CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO, 2015).

O mercado mundial de produção de aço sofreu uma elevação de 760 % entre 1950 e 2015 (Worldsteel Association, 2016). O maior responsável por esse aumento é a China. O Brasil é o oitavo maior produtor de aço em nível mundial. De acordo com dados publicados pelo Instituto Aço Brasil (IABr), no ano de 2015 o país produziu cerca de 33 milhões de toneladas (Mt) de aço bruto (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016b).

Se por um lado a utilização do aço resultou em evoluções importantes para a sociedade, por outro, os efeitos sobre o meio ambiente proporcionados pelas tecnologias de processo usadas em sua manufatura são inexoráveis. O processamento desse bem de produção se caracteriza por elevados consumos de insumos naturais, energia elétrica e térmica, e de água, bem como, pela quantidade expressiva de emissões para o ar – de Gases de Efeito Estufa (GEE), e materiais particulados –, água e solo – nesse caso sob a forma de lamas e escórias.

Dadas essas características, a existência de uma condição harmônica entre o processamento do aço e o meio ambiente passou a ser um diferencial de mercado. Na busca por tal equilíbrio as empresas trataram de investir em seus processos e formas de gestão para tornar os produtos capazes de atender as demandas de quantidade e qualidade e, ao mesmo tempo, reduzir impactos sobre o entorno (RYMAN E LARSSON, 2006).

Uma das formas mais efetivas – ainda que pouco frequente em um setor tão tradicional – de tornar tal ação coordenada e sinérgica é realizar uma análise sistêmica e integrada que considere todo o ciclo de vida da obtenção do aço, com vistas a identificar oportunidades de melhoria de desempenho ambiental ao longo desse arranjo. Ou seja, e em outras palavras, conduzir uma verificação fundamentada na aplicação da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

A ACV vem se destacando como ferramenta de apoio a processos de tomada de decisão que tenham em conta a dimensão ambiental como variável de análise (GUINÉE *et al.*, 2011). No Brasil o uso desta técnica tem ganhado espaço em muitos setores produtivos, mesmo persistindo obstáculos à sua consolidação como falta de banco de dados e de modelos capazes de verificar impactos de âmbito local (ZANGHELINI *et al*., 2016). A correção dessa dissintonia por meio da construção de um repositório para bases de dados genuínas e próprias da região, bem como a formação de competências no campo da ACV, poderiam potencializar sua aplicação no país.

A cadeia de produção do aço é verticalizada; ou seja, na grande maioria dos casos, os estágios de produção da organização compreendem desde a extração de matérias-primas (minério de ferro) até a conformação do produto final, passando por vários estágios de transformação. Por conta disso, o processamento oferece oportunidades atraentes para condução de um estudo de ACV. As características do diagnóstico gerado a partir dessa iniciativa abrem possibilidades de que sejam propostas ações potenciais de melhoria cuja validade ambiental poderia – mais à frente dentro, por exemplo, de um processo de gestão baseado na lógica de melhoria contínua – ser verificada por nova aplicação da técnica, previamente à sua efetiva implementação.

2. OBJETIVOS GERAIS E COMPLEMENTARES

Tendo em vista o contexto apresentado no capítulo introdutório desse documento, o presente estudo acadêmico tem por objetivos gerais:

- Estabelecer um diagnóstico consistente e representativo do desempenho ambiental do processo de produção de aço líquido para condições tecnológico-operacionais médias praticadas no Brasil; e

- Propor, a partir dessa investigação, ações que resultem em melhoria potencial daquela performance.

Como objetivo complementar desta pesquisa espera-se também dar uma contribuição para o Banco de Dados brasileiro de apoio a estudos de ACV.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. O Processo do Aço

3.1.1 Panorama Atual do Mercado Produtor de Aço

Em torno de 1444 o minério de ferro passou a ser fundido em Altos Fornos, processo que é utilizado até hoje. Entretanto, somente quando se descobriu como fazer aço, em 1856, é que uma grande mudança na história aconteceu. Isso porque o aço é mais resistente e pode ser produzido em grandes quantidades, servindo de matéria-prima para muitas indústrias.

A indústria de aço é a segunda maior indústria mundial – ficando apenas atrás de petróleo e gás. O setor gera cerca de dois milhões de empregos diretos e seis milhões de postos de trabalho indiretos, sendo um terço por meio de empresas contratadas e o restante em indústrias de suporte ao processo de produção em si (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2015).

O mercado de aço, entretanto, enfrentou diversas crises nos últimos anos. Dentre os eventos que mais impactaram negativamente esta produção em âmbito mundial estão (i) os Choques do Petróleo, já que por conta do aumento do preço do recurso, ocorreu uma contração generalizada do mercado internacional que resultou em excedente de aço no mercado; e (ii) a redução dos valores de venda dos produtos para exportação. Além disso foram também motivos de redução de volume de negócios no segmento a fragmentação da ex-URSS, que influenciou de forma pontual na produção de aço em 1991, e a chamada Crise do Subprime de 2008, outro evento que resultou em desdobramentos econômicos negativos de amplitude global. Como um contraponto de tais eventos, destaca-se o assim chamado “efeito China”, pais cuja indústria siderúrgica passou a demonstrar crescimento acelerado já a partir de meados da década de 1980, e que se intensificou no curso das décadas de 1990 e de 2000. Oliveira e Solero (2014) apontam este fenômeno como responsável por sustentar a inflexão positiva da trajetória de avanço do setor mundial de aço mesmo diante dos reveses antes indicados.

Um marco importante para o setor brasileiro ocorreu no início dos anos 1990 com a privatização das empresas estatais as quais, à época, detinham aproximadamente 70 % da produção nacional. Durante a primeira metade da década de 1980 as grandes siderúrgicas mantidas pelo Governo brasileiro estavam endividadas e, portanto, sem capital para investir em desenvolvimento tecnológico. Como decorrência disso essas companhias passaram

paulatinamente a apresentar baixos índices de produtividade frente aos pares nacionais e internacionais.

Para postergar a crise iminente que se instalaria diante dessa situação o Estado era forçado a realizar repetidos e vultosos investimentos nas organizações, a fim de mantê-las em funcionamento (OLIVEIRA E SOLERO, 2014). Em 1990 o Governo decidiu rever a fundo a questão e como resultado dessa análise criou o Plano Nacional de Desestatização. A partir dessa ação oito das principais siderúrgicas brasileiras foram vendidas à iniciativa privada entre 1991 e 1993 (FONSECA *et al*., 2010).

De 1950 a 2015, a produção de aço aumentou em 760 %. No entanto, os resultados mais expressivos foram alcançados exatamente no período 2005 – 2015 quando o processamento de aço bruto em nível mundial saltou de 1,15 bilhões de toneladas (MMt) para 1,62MMt; ou seja, um aumento de 41 %. Nesse período (Tabela 1), a China manteve-se como principal produtora do bem, elevando em 60 % sua participação no cenário internacional. Isso ocorreu pelo fato de o mercado chinês avançar sobre nichos outrora ocupados por importantes centros produtores, casos da União Europeia e do NAFTA (North American Free Trade Agreement). Com isso o aquele país atingiu a marca expressiva de, quase, 50 % de participação na produção do planeta em 2015.

Tabela 1 - Ranking dos principais produtores mundiais.

	2005			**2015**	
		% Produção Mundial			*% Produção Mundial*
1°	China	31,0 %		China	49,6 %
2°	União Européia	17,0 %		Outros Ásia	12,6 %
3°	Outros Ásia	11,4 %		União Européia	10,2 %
4°	NAFTA	11,0 %		NAFTA	6,8 %
5°	CIS	9,9 %		Japão	6,5 %
6°	Japão	9,8 %		CIS	6,3 %
7°	Demais	7,7 %		Demais	5,8 %
8°	Outros Europa	2,2 %		Outros Europa	2,2 %
9°	Brasil	2,9 %	**8°**	Brasil	2,1 %

Fonte: Adaptado de World Steel Corporation (World Steel in Figures, 2016).

No mesmo período outros produtores também asiáticos passaram a investir fortemente no setor, elevaram seus volumes de produção em cerca de 11 %, e assim, saltaram para o segundo posto do mesmo ranking.

Embora tenham invertido suas colocações, o Japão e a Comunidade dos Estados Independentes (CIS) mostram ter mantido uma produção absoluta estável. O Brasil – integrante do grupo denominado de '*Demais'* na classificação do World Steel Corporation também manteve sua contribuição relativa, movimento que lhe garantiu a oitava posição naquela ordenação.

O cenário atual do mercado de aço é caracterizado por um excesso de capacidade instalada de produção com uma baixa demanda por este produto. Para o ano de 2015, por exemplo, o mundo teve capacidade instalada de aproximadamente 2,4 MMt, enquanto a demanda alcançou apenas 1,7 MMt. Esses números indicam um excesso de material disponível superior a 740 Mt. O excesso deve-se em parte ao crescimento da China, responsável por aproximadamente 60 % desse excedente (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016b). Além disso, também os preços atuais das matérias-primas e as oscilações cambiais expostas a grande volatilidade, impulsionando negativamente o mercado de aço.

Para 2015 a Worldsteel Association (2016) reportou uma redução de produção de 2,9 % em relação ao movimento de 2014, motivado pela desaceleração de produção da China – embora ainda permaneça na liderança no ranking com uma produção de 804 Mt de aço – em relação a 2013 e 2014. Ao que tudo indica, o Japão se consolidou na segunda posição do ranking ao atingir 105 Mt no período. Outro sinal de prognóstico nada auspicioso para o futuro remete à margem do índice o Earning Before Interests, Taxes, Depreciation ande Amortization (EBITDA), que entre 2005 e 2013 caiu de 18 % posição confortável perante ao risco de obsolescência (acima de 16 %) para 10 %, exatamente o limiar do risco de sobrevivência (abaixo de 9 %).

O Brasil tem hoje o maior parque industrial de aço da América do Sul. O país é o maior produtor da América Latina e seguiu como oitavo maior produtor de classe mundial em 2015. De acordo com dados publicados pelo Instituto Aço Brasil (2016b), no período supracitado o país produziu 33 Mt de aço bruto, muito embora sua capacidade instalada seja de 49 Mt/ano; esse desempenho projeta um índice de ociosidade de superior a 30 %.

O país conta com um parque siderúrgico composto por 29 usinas que são administradas por 11 grupos empresariais. O Brasil ocupa a 11ª posição mundial no quesito exportação direta e apresentou, também no ano passado, um consumo per capita de 104 kg/hab.ano. Os principais consumidores seguem sendo os setores de construção civil, bens de capital, e equipamentos.

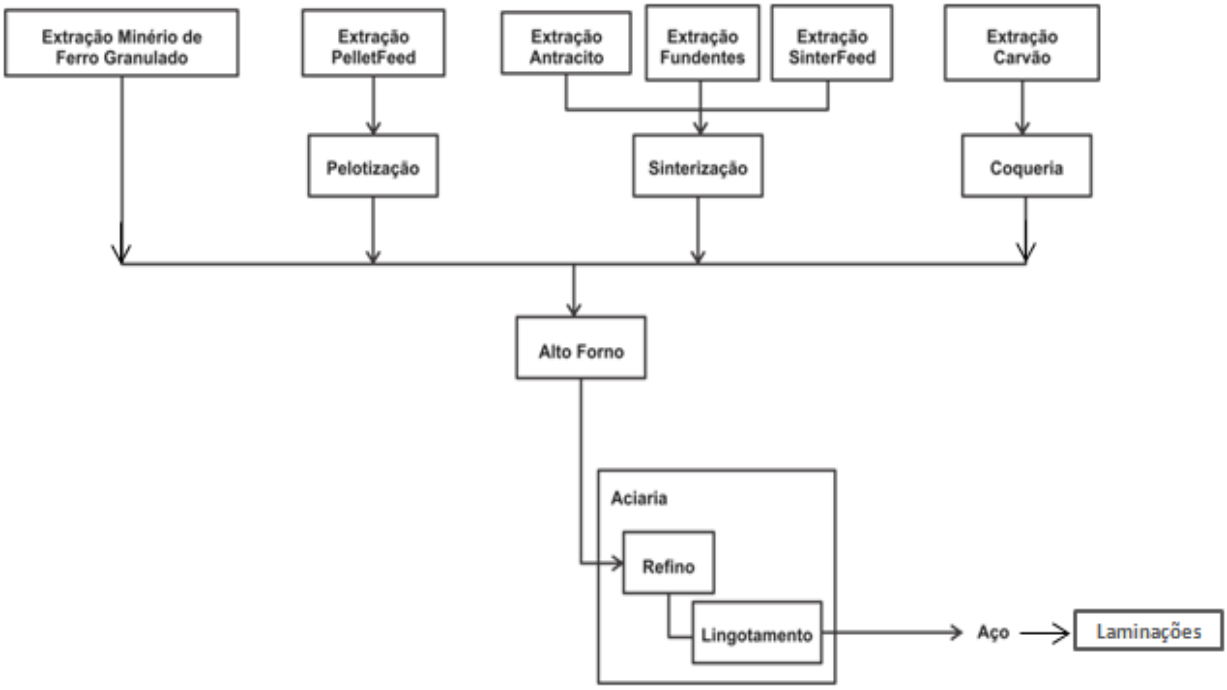
O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) registrou retração de 3,8 % do PIB de 2015 em relação ao do ano anterior. Neste contexto o setor industrial aportou variação negativa de 6,2 %. A indústria de transformação contribuiu para esse desempenho com recuo de 9,7 %. A retração econômica nesse caso se explica (i) pela diminuição da demanda interna de produtos siderúrgicos principalmente nos segmentos de veículos, máquinas e equipamentos e aparelhos eletroeletrônicos, e (ii) pela diminuição das taxas de exportação dada a falta de competitividade com o mercado externo. Em 2015, aproximadamente 3,2 Mt de aço importados entraram no país, dos quais 50,2 % procederam da China. Em termos de oferta, aquele montante de produtos representou cerca de 13 % do consumo aparente interno no período (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016b).

A perda de competitividade do setor siderúrgico nacional é sistêmica e se deve em sua maior parte à cumulatividade de impostos, custos de energia elétrica, gás natural, e infraestrutura, dentre outros (GANDRA, 2014). Tais fatores restringem o avanço da produção nacional muito embora o Brasil detenha um parque produtivo moderno, capacidade de atendimento ao mercado interno, profissionais qualificados, boa disponibilidade de minério de ferro de alta qualidade, proximidade entre usinas, e infraestrutura portuária adequada (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013).

3.1.2 Processo de produção do Aço

Segundo relatório da Word Steel Association (2012) cerca de 70 % da produção mundial do aço ocorre por intermédio da rota de Altos Fornos/Convertedores. Nesse arranjo (Figura 1), o processamento compreende basicamente as etapas de (i) extração de recursos naturais, (ii) aglomeração do minério de ferro (Sinterização/Pelotização), (iii) produção do combustível e agente redutor do ferro (Coqueria), (iv) redução do óxido de ferro em Ferro Gusa (Alto Forno), (v) refino do gusa para obtenção do aço e sua solidificação em placas (Aciaria); e, por fim, (vi) conformação mecânica (Laminação).

Figura 1 - Etapas do processo de produção de aço.



Cada uma dessas etapas será descrita a seguir em maiores detalhes no que se refere às suas características, especificidades, tecnologias e parâmetros operacionais típicos.

3.1.2.1 Sinterizações/Pelotizações

A adição de óxido de ferro aos Altos Fornos se dá principalmente a partir de duas possibilidades de administração, sendo ambas, na forma de cargas preparadas: o sinter e a pelota. No processo de Sinterização, o *sinter feed* (minério de ferro com granulometria média de 1 mm) é aglomerado gerando carga preparada rica em ferro, o sinter produto. O mesmo acontece nas Pelotizações, onde o *pellet feed* (material passante em peneira de 100 mesh, 0,149 mm) também é aglomerado para gerar a pelota.

No processo de Sinterização o *sinter feed* e o minério de manganês, os combustíveis (finos de coque e antracito), calcário, cal e dolomita (fundentes), subprodutos (vazamento de correias, carepa, lamas), além de outros aditivos, seguem para misturadores a fim de serem homogeneizados. Nesta etapa há o acerto da umidade do conjunto de matérias-primas (~ 90 kg/t sinter).

O material, então em estado bruto, é dosado sobre uma esteira para ser exposto à ignição por meio da ação de queimadores movidos principalmente por gás de coqueria (GCO). O gás quente em contato com a área incandescente da mistura, então a 1200 °C, e o ar atmosférico

excedente são succionados por caixas de vento que se encontram colocadas abaixo da esteira. Estas caixas de vento estão ligadas por meio de dutos a precipitadores eletrostáticos e filtros manga, os quais são responsáveis por reduzir a quantidade de particulados na mistura gasosa antes de liberá-la ao meio ambiente.

O succionar deste ar em associação com o movimento da esteira, leva a camada superficial formada pela ignição do material – a frente de combustão – a ser mover verticalmente ao longo material até, que ao final do trajeto percorrido pela esteira todo o material esteja sinterizado (CASTRO, 2012). De toda a energia requerida para movimentação da frente de combustão, cerca de 85 % procedem do combustível (coque fino); já o restante vem da ignição (do queimador) (INFOMET, 2015). A sinterização do material acontece via reações de fusão e solidificação que ocorrem consecutivamente até haver aglomeração do material, formando assim o sinter bruto.

O sinter bruto é resfriado e classificado em dois cortes dimensionais: $\varphi < 4{,}76$ mm (sinter fino) e $4{,}76 < \varphi < 12{,}5$ mm (*small sinter*). O material com granulometria $\varphi > 12{,}5$ mm, conhecido por sinter metalúrgico, é conduzido aos Altos Fornos.

O *small sinter* também é consumido nos Altos Fornos, porém em quantidades mais discretas, na ordem de 2-3 % do carregamento total da mistura de minérios desse equipamento. Caso haja excedente, o *small sinter* costuma ser utilizado em outra etapa do processo (Aciaria) como refrigerante. Ao ser adicionado ao aço na Aciaria, o *small sinter* – então a temperatura ambiente – auxilia no controle térmico quando há excesso de energia no material. Já a fração fina retorna para o próprio processo de sinterização sendo incorporada à mistura bruta (INFOMET, 2015).

A Sinterização é capaz de reciclar subprodutos e pós que sejam produzidos na própria siderurgia. No entanto, para que suas operações sejam realizadas, o processo predispõe elevado consumo de energia, principalmente de origem não renovável, como coque e antracito (CASTRO, 2012). O consumo de combustível sólido nas Sinterizações varia de 45-60 kg/t sinter produzido. Para minimizar esse total, muitos estudos sobre verificação das potencialidades de combustíveis alternativos têm sido realizados nos últimos anos (NORGATE *et al*., 2012).

Na Pelotização, minério de ferro com granulometria entre 30-70 µm (conhecido como *Pellet Feed*), calcário e aglomeradores são adicionados sobre tambores inclinados giratórios, que

formam as pelotas cruas com diâmetro aparente variável entre 9-16 mm. Essas pelotas serão queimadas gerando as chamadas pelotas para Altos Fornos. A queima na pelotização ocorre por combustão de óleos, gás natural e outros combustíveis que geram gás quente responsável por queimar as pelotas cruas (INFOMET, 2015).

Em linhas gerais, essa etapa da cadeia produtiva também traz efeitos adversos ao ambiente, que se manifestam sob a forma de emissões de GEE, e material particulado (FIRTH E MANUEL, 2005). A tecnologia de produção de pelotas ainda não está consolidada em todas as usinas produtoras de aço e assim, é relativamente usual que esse bem seja adquirido de fornecedores externos.

Outro material ferroso utilizado *in natura* é o Minério Granulado. Obtido de ações de mineração com especificação granulométrica variável entre $6{,}0 < \phi$ (mm) $< 25{,}0$ (portanto, com dimensões maiores do que o *sinter feed*) este material pode ser adicionado diretamente nos Altos Fornos após peneiramento. Seu uso fica condicionada a fatores técnico-econômicos como preço, teor de ferro e principalmente nível de produtividade dos Altos Fornos. Por se tratar de material não preparado, seu uso é restrito para altos níveis de produtividade de processo.

3.1.2.2 Manuseio de Carvão/Coqueria

Nas plantas integradas, ou seja, que operam as três fases básicas: redução, refino e laminação, a matéria-prima responsável pelo fornecimento de carbono é o coque, obtido na Coqueria. O mix de carvões minerais escolhidos para a produção do coque é uma variável fundamental para determinar sua qualidade.

O índice Rank, que corresponde ao teor de material volátil de um carvão, bem como a procedência do carvão em si, influenciam na dureza e no rendimento de conversão do carvão em coque, enquanto a composição química dos carvões influenciará em sua qualidade química. Restrições em teores de cinza, enxofre e fósforo, são fatores cruciais para determinação da qualidade do coque e sua utilização como combustível nos Altos Fornos (GEERDS *et al*., 2009).

Uma prática comum é a utilização de Coque Verde de Petróleo (CVP) nas misturas de carvão. O CVP é um resíduo resultante da destilação do petróleo – de alto teor de carbono, e baixa

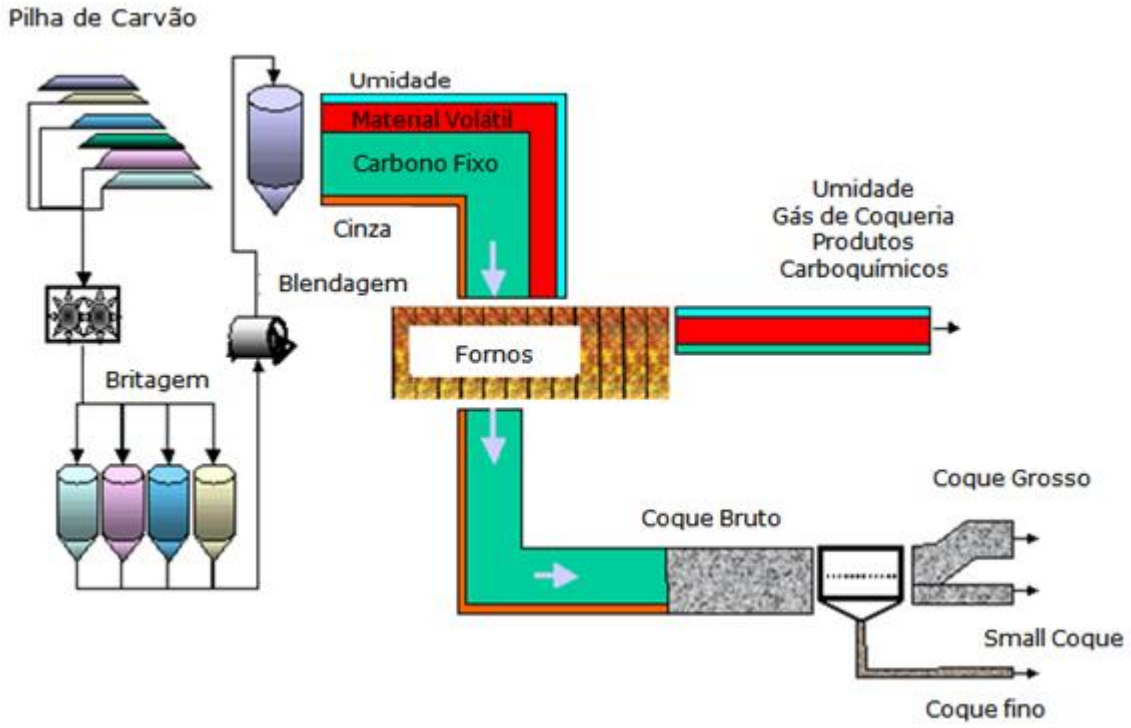
taxa de material volátil – usado na mistura de carvões para favorecer aumento do tamanho médio e da resistência mecânica do coque metalúrgico (VIANA, 2007).

Em termos de processo, a mistura de carvões é aquecida em fornos com atmosfera redutora com vistas à liberação de compostos voláteis. As reações de pirólise do carvão se desenvolvem preferencialmente das paredes para o centro do equipamento.

Durante essa ação o carvão passa por estágios de amolecimento, contração e, posteriormente, de solidificação. Dessas transformações são geradas duas classes de produtos: (i) o coque em si, obtido na forma sólida; e (ii) a fração gasosa, composta respectivamente por gás de coqueria (COG) e produtos Carboquímicos (alcatrão, benzeno, naftaleno, entre outros) (COSTA *et al*., 2013).

O coque deixa o forno a cerca de 1300 ºC e precisará ser resfriado para cumprir suas funções de processo. Para tanto, o produto segue para as chamadas torres de extinção (ou apagamento). O processo de extinção mais usual é o de apagamento a úmido. Nele o coque incandescente entra em contato direto com água. Aproximadamente 95 % dessa água evapora, dada a temperatura elevada do coque; o restante acaba sendo incorporado ao produto.

Figura 2 - Principais fluxos do processo de coqueificação de carvões.



A etapa de coqueificação destaca-se pelos elevados consumo energético e emissões de GEE. Estima-se que 50 % da energia total do processo integrado de produção de aço seja despendido nessa etapa do processo (HASANBEIGI *et al*., 2010). Já o apagamento, quando realizado a úmido, consome, evidentemente, elevada quantidade de água. A Figura 2 mostra de forma simplificada os principais fluxos de entrada e saída do processo de coqueificação de carvões.

3.1.2.3 Altos Fornos

Altos Fornos são os principais equipamentos da Siderurgia; seu principal objetivo é a redução do óxido de ferro que ocorre por intermédio do carbono proveniente do coque. O Alto Forno é compreendido por cinco regiões: (i) topo, por onde as matérias-primas são carregadas; (ii e iii) cuba e ventre, nas quais ocorrem respectivamente, aquecimento e redução dos insumos de processo; (iv) rampa, região em que estão localizadas ventaneiras nas quais ocorre a combustão do coque; e (v) cadinho, por meio do qual o material líquido é drenado.

As cargas ferrosas – sinter metalúrgico, minério granulado e pelota – bem como o coque, serão alimentados no topo do reator de maneira a formar camadas alternadas de material. A combustão do coque acontece quando este atinge a base do equipamento em frente às ventaneiras.

Tais equipamentos são responsáveis por soprar oxigênio (O_2), ar aquecido (até ~1200 ºC) e carvão pulverizado os quais provocam a combustão do coque. No processo, que se desenvolve sob temperatura de 2100 °C – 2300 °C, há liberação de monóxido de carbono (CO) que percola a massa reacional em contracorrente. O CO é responsável pela redução o óxido de ferro, que ocorre quando a carga de minério atinge entre 1100 °C – 1200 °C. Ao ser reduzido, o ferro (então em estado líquido) goteja sobre a massa sólida e ainda não reduzida. No caminho até chegar ao cadinho este incorpora impurezas como fósforo e carbono. Nessas condições, o gusa líquido deixa o forno com uma composição aproximada de 95 % Fe total (QUITES *et al*., 2013).

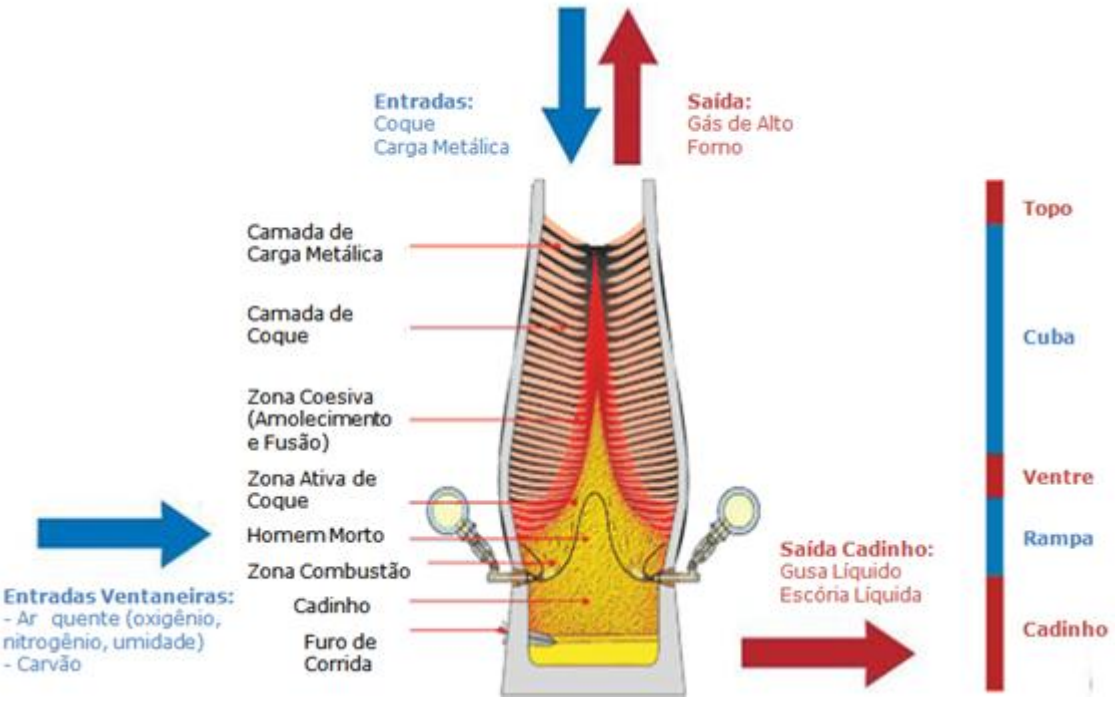
Durante a redução, espaços vazios acabam sendo invariavelmente criados na massa reacional; e será exatamente por esses interstícios que se dará a passagem do gás. Nessa ação ocorre a liberação das impurezas - a escória, constituída principalmente de sílica. A escória funde a cerca de 1400 °C, estando, portanto, em fase líquida nas condições em que o Alto Forno opera

(QUITES *et al*., 2013). Por terem diferentes densidades, o gusa líquido e a escória não se misturam e dessa forma, ambos podem ser drenados separadamente na base do forno.

Além da escória, a unidade gera também gás de Alto Forno (GAF) o qual, após ser emanado, passa por lavagem originando também a chamada lama de Alto Forno (GEERDS *et al*., 2009). Quando não é reciclada internamente nas Sinterizações, essa lama é destinada a indústrias do segmento cerâmico – atuando como fornecedora de carbono, portanto, de energia –, ou será disposta em Aterros Sanitários. A Figura 3, descreve de forma esquemática a fabricação de gusa nos Altos Fornos. Esta fase do processo também se caracteriza por elevado consumo energético, emissão de GEE e particulados. Com taxas de injeção de carvão pulverizado de 200 kg/t gusa, os Altos Fornos podem operar com consumo de coque abaixo de 300 kg /t gusa (GEERDS *et al.*, 2009).

Muitos dos Altos Fornos projetados mais recentemente estão equipados com turbinas de topo capazes de produzir energia elétrica a partir da pressão exercida por esse gás ao deixar o reator, reduzindo assim a dependência do processo de fontes externas a ele (MOYA E PARDO, 2013).

Figura 3 - Esquema simplificado de produção de gusa nos Altos Fornos.



Fonte: adaptado de Geerds *et al.* (2009).

3.1.2.4. Aciaria e Laminações

A atividade de Aciaria pode ser realizada por meio da operação dos seguintes equipamentos: Convertedor (BOF), Forno de Arco Elétrico (EAF) ou Forno de Soleira Aberta (OHF). Os processos que ali se desenvolvem tem por objetivo principal refinarem o ferro gusa. Cerca de 70 % de toda a produção de aço é realizada na rota Altos Fornos/Convertedores (BOF). Outros 29 % utilizam o EAF e apenas 1,0 % ocorre a partir do uso de OHF (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2012).

A rota que se vale dos Convertedores utiliza como matérias-primas básicas ferro gusa líquido e sucata de aço, sendo esta última administrada a taxas de até 30 % do carregamento – um limite estabelecido em função do aporte térmico que lhe será necessário.

Nessa tecnologia O_2 é injetado por meio de uma lança refrigerada que provoca a liberação de grande quantidade de calor. Isso ocorre dada a oxidação do carbono ainda presente no material líquido. Como o processo de oxidação se dá sob condições controladas, há também produção de CO o qual será responsável pela agitação do material. A geração de energia do processo restringe-se à administração de O_2, não sendo, portanto, necessária a adição de qualquer outra fonte térmica.

A injeção cessa quando o teor de carbono no aço atinge limites inferiores a 2 $\%_{w/w}$ (ASIAN PACIFIC PARTNERSHIP, 2010). O Aço líquido pode ser conduzido para o Refino Secundário (no qual há acertos de qualidade mais específicos), ou seguir diretamente para o lingotamento, para então ser conformado em placas, tarugos ou blocos.

O processo da Aciaria gera o Gás de Aciaria (GAC), cuja lavagem – realizada para efeito de atendimento de requisitos legais de controle de poluição – resulta na produção de lama, que tanto pode ser reciclada internamente no processo, como seguir para aterramento sanitário. As placas podem também ser encaminhadas para laminação, quando são expostas a conformação mecânica para se transformarem em bobinas ou chapas. Esse processo pode ocorrer a frio (Laminação a Frio) ou a quente (Laminação a Quente) (HASANBEIGI *et al.*, 2010).

3.1.3. Aspectos Ambientais associados ao Processamento do Aço

O processo de fabricação do aço caracteriza-se em geral, pelo elevado consumo de insumos naturais, energia elétrica e térmica, água, e também pela grande quantidade de emissões de particulados, lamas, escórias e gases de efeito estufa.

Segundo o relatório da Worldsteel Association (2014), em termos quantitativos a fabricação de 1,0 t aço pela rota Alto Forno/Convertedor consome em média 1,4 t de minério de ferro e 740 kg de carvão. Depoimentos constantes do "Sustainable Steel at the Core of Green Economy" (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2012) feitos por companhias de classe mundial do segmento de aço relatam que a quase totalidade das matérias-primas alimentadas nesse processo de fabricação acaba sendo convertida em produto, e que apenas uma pequena parcela é descartada para o ambiente.

A qualidade do ar é parâmetro de grande importância na indústria siderúrgica devendo, portanto ser mapeada e controlada. Essa composição é bastante influenciada pelos elevados consumos energético e de matérias-primas do processo. Dessa forma, há elevada emissão de GEE – em particular, de gás carbônico (CO_2) –, e de gases de Chuva Ácida como os óxidos de nitrogênio e enxofre (NO_x e SO_x).

A emissão de CO_2 representa 93 % de todo o GEE emitido pela indústria de aço (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2012).O processo é responsável por emitir cerca de 1,7 t CO_{2eq} na forma de GEE para cada tonelada de aço produzido; aliás, e diga-se de passagem que o setor emite cerca de 6,7 % de todo CO_2 global das indústrias segundo a US Energy Information Administration (EIA, 2010).

A Sinterização, é responsável por emitir mais da metade de todo o CO_{2eq} produzido na indústria do aço devido a grande quantidade de combustível sólido necessário para ignição da matéria-prima (OYAMA *et al.*, 2010; 2011). Além disso, dadas suas características, este processo pode ter elevada emissão de particulados e, por isso, muitas tecnologias foram desenvolvidas com o intuito de minimizar a emissão desses agentes nocivos para o ar; a dizer: sistemas de filtragem do ar (filtros manga e precipitadores eletrostáticos), lavadores de gases, dentre outros.

O processo de produção de aço impõe elevados consumo de água salobra e doce para contato direto com o produto, ou para resfriamento. Quando possível, a água do mar é a preferência

deste setor para as áreas de resfriamento, devido à disponibilidade e o baixo custo. Além disso, há pouca alteração na qualidade da água de resfriamento – ligeiro ganho de temperatura – e dessa forma, esta pode, sem dificuldades, retornar para o mar. Outras finalidades da água no processo siderúrgico estão nas operações de decapagem e lavagem de gases. Atualmente com as tecnologias disponíveis, o setor já é capaz de praticar o reuso e o reciclo de grande quantidade da água captada (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2011).

A prioridade das indústrias produtoras de aço é, no entanto, a redução do consumo de energia. Isso porque os custos associados a essa utilidade representam de 20 – 40 % do custo total do aço (ASIAN PACIFIC PARTNERSHIP, 2010). Segundo o relatório "Sustainable Steel Policy and Indicators 2014" (WORLSTEEL ASSOCIATION, 2014) nos últimos 50 anos a indústria do aço reduziu em 60 % seu consumo energético direto, atingindo uma demanda para produção de aço bruto de 20 GJ/t.

O Relatório de Sustentabilidade do Instituto Aço Brasil (2016a) para o ano de 2015 dá conta de que a matriz energética do setor siderúrgico brasileiro foi composta em 75 % pelo Carvão Mineral/Coque, 12 % por derivados de petróleo, 7,0 % por carvão vegetal, e 6,0 % por energia elétrica. O índice de recirculação de água doce compreendeu a 95,5 % com um volume absoluto de cerca de 5,4 bilhões m^3. As gerações de coprodutos e resíduos ficaram na casa de 594 kg/t aço bruto produzido, resultando em aproximadamente 20 Mt no ano. Do total da geração, cerca de 88 % foram reaproveitados.

As empresas siderúrgicas participam de acordos internacionais para preservar o meio ambiente. Nos anos 1990 a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima estabeleceu metas de redução de emissão de GEE e exigiu que os países desenvolvidos deveriam apresentar projetos na modalidade Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Durante a Convenção de Estocolmo, em 2004, exatos 50 países se comprometeram a elaborar planos nacionais de controle de Poluentes Orgânicos Persistentes (POP´s). A siderurgia mostra-se comprometida com ambas as iniciativas, além de outras no mesmo sentido.

3.2. Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

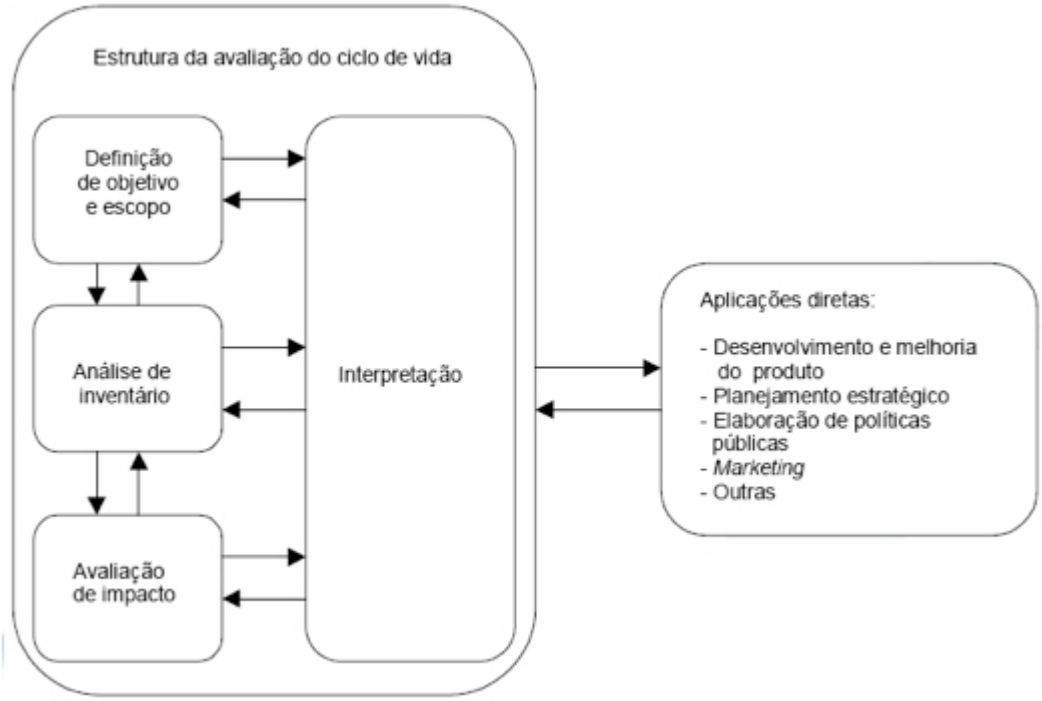
3.2.1 Conceitos, Usos e Aplicações, Características Metodológicas

Ciclo de Vida de um sistema é o conjunto de etapas que inclui todas as interações antrópicas do processo com o meio ambiente. Essas interações tornam-se consequência da funcionalidade de um produto, ou seja, são fruto para que este desempenhe sua função plena. As interações incluem desde a extração de matérias-primas até seu destino final, passando por todas as etapas de produção (SEO E KULAY, 2006).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de um produto ou serviço trata-se da técnica que faz a análise dos impactos ambientais das interações para avaliar o desempenho ambiental de um processo. A ACV permite uma visão sistêmica na avaliação dos produtos, materiais e processos através da quantificação das cargas ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto desde a extração de matérias-primas, fabricação, e uso à disposição final. Por essa razão, esta avaliação é também chamada de "avaliação do berço ao túmulo" ("*cradle-to-grave*") (SEO E KULAY, 2006). Entretanto, não é infrequente encontrar estudos baseados em abordagens do tipo 'portão a portão'(*'gate-to-gate'*) - quando a análise se restringe a uma etapa ou equipamento específico da cadeia de produção - ou através de abordagem 'berço ao portão' (*'cradle-to-gate'*) – quando a análise é conduzida até a produção de um produto intermediário da cadeia produtiva.

Esta técnica é muito utilizada para comparar o impacto ambiental de diferentes produtos com similar função (ABNT, 2009). Nas normas publicadas para o método, a avaliação do ciclo de vida está divida em quatro fases: a determinação dos objetivos e do escopo, a análise de inventário, a avaliação dos impactos e a fase de interpretação. As fases da avaliação de ciclo de vida interegem entre si durante toda a execução de um estudo de ACV devido adequações que possam ocorrer no decorrer do mesmo, como demonstrado na Figura 4.

Figura 4 - Fases de estudo de ACV.



Fonte: ABNT (2009).

Embora conceitualmente simples e atraentes, as avaliações do ciclo de vida são, na realidade, difíceis de realizar. Em geral a técnica de ACV é aplicada para identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental, concessão de rótulos e selos, comunicação ambiental, comparação de desempenho ambiental de produtos com mesma função, projetos de novos produtos e processos ou até a remodelação daqueles já existentes.

A Rotulagem ambiental, por exemplo - também chamada de Selo Verde - é uma das estratégias das corporações para agregar valor e credibilidade a sua marca e o fazem por meio da comunicação de ações e visões em relação à responsabilidade socio-ambiental na embalagem de seus produtos (NAKAHIRA E MEDEIROS, 2009).

Neste contexto, Rodrigues e Scherdien (2013) analisaram sabonetes cosméticos atendo-se à eficácia de sua comunicação ambiental visual. Os autores verificaram impactos ambientais associados à produção do bem em si e de embalagem. O fato do sabonete ser oriundo de matéria-prima de origem vegetal renovável indica que em seus processos de cultivo e extração foram aplicadas práticas mais sustentáveis, ou seja, com menor impacto ambiental e social.

Lage (2014) utilizou ACV para comparar livros impresso e digitais com respeito a função de comunicação de informações. A autora levou em consideração todo o ciclo de vida dos

produtos desde a extração de matérias-primas, até sua disposição final. Por meio dessa análise Lage concluiu, ainda que de forma preliminar e com ressalvas, que leitura de livros no formato digital apresenta um menor impacto ambiental quando comparada com a dos livros impressos.

A ACV foi concebida no pilar principal de uma avaliação de cunho ambiental do ciclo de vida, ou seja, Análise de Ciclo de Vida Ambiental. Atualmente o paradigma das organizações e sociedade não é só desenvolver ações de proteção ambiental, mas tornassem sustentáveis. Ser sustentável é agenciar a diminuição dos impactos ambientais e também promover o senso de justiça social e prosperidade econômica (BRUNTLAND, 1987; BRAND, 2002; FINKBEINER *et al.*, 2010).

Com intuito de sustentar uma dessas vertentes, nasce o conceito de Avaliação de Custo de Ciclo de Vida (ACCV) que examina custos totais da produção, sob os enfoques do negócio - custos de produção –, e da cadeia de consumo – custo do ciclo de vida do produto ao longo de um período de tempo após sua manufatura (EYERER, 1996; FINKBEINER E SAUR, 1999; FINKBEINER *et al.*, 2010).

Na linha social há também a Avaliação de Ciclo de Vida Social (ACVS). Esta técnica consiste em avaliar os impactos ou impactos potenciais sociais e sócio-econômicos de um produto ou serviço durante todas as etapas de produção, deste a extração até a disposição final (UNEP/SETAC, 2009). A avaliação enfoca em aspectos relacionados a direitos humanos, condições de trabalho e herança cultural, dentre grupos como comunidade local, sociedade e consumidores (ACV BRASIL, 2015) afetando positivamente ou negativamente estes steakholders.

Por fim, a Avaliação de Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) aparece contemplando em uma só avaliação, todas as vertentes descritas e sendo portanto, uma visão mais moderna da proteção ambiental. Nela encontram-se a harmonia do tripé ambiental, social e econômico em uma visão cooperativa, proativa, de escopo mais global e integrada ao processo (FINKBEINER *et al.*, 2010).

Do ponto de vista de metodologia, atualmente distinguem-se na comunidade internacional de ACV dois procedimentos distintos para as análises: um de cunho mais convencional, a ACV Atribucional e outro mais recente, a ACV Consequencial. A ACV Atribucional é a avaliação ambiental de um processo em um estado isolado e único. Nela as cargas ambientais do

processo ou serviço são analisadas como se este não estabelecesse conexões com quaisquer outras atividades antrópicas, em âmbitos temporais retrospectivo ou prospectivo (MUNIZ, 2012).

Finnveden *et al.* (2009) e Muniz (2012) defendem que as atividades contidas em um universo causam interferências entre si por estarem interligadas. Dessa forma, relatam que isolar as cargas ambientais de uma dessas atividades do universo em que estão contidas não é uma tarefa simples. Nessa linha, surge a ACV Consequencial. Nela avaliam-se consequências ambientais futuras provocadas pelo uso do produto em estudo (MUNIZ, 2012).

Pode-se afirmar que é o efeito em cadeia de uma ação atual (ou a previsão do efeito de uma ação futura) que tem implicação não só dentro do próprio ciclo de vida do produto, mas também por todos os sistemas tecnológicos e econômicos que o circundam. Dessa forma, a ACV Consequencial pode também ser retrospectiva – quando se avaliam as consequências de uma ação passada; ou prospectivo – no momento em que se verificam os desdobramentos de uma decisão futura em todas as cadeias interligadas. Quando o objetivo é a descrição dos aspectos ambientais do produto em estudo, a análise atribucional é mais indicada. Entretanto, quando uma tomada de decisão faz parte do estudo, aconselha-se o enfoque consequencial (TILLMAN, 2000; MUNIZ, 2012). Em processos em que são gerados concomitantemente mais de um produto é importante que a contribuição dos fluxos de entrada e saída, assim como as cargas ambientais associadas ao processo sejam proporcionalmente distribuídas entre a geração dos diversos produtos. Esta distribuição acontece através da prática de alocação e pode ser efetuada por meio de critérios de proporcionalidade de massa, volume e até valor econômico (BAUMANN E TILLMAN, 2004; ABNT, 2009).

Para análises tradicionais (ACV Atribucional) a definição a ser tomada sobre processo de alocação das cargas ambientais é uma etapa importante da análise. A subjetividade introduzida pela aplicação de procedimentos de alocação podem ser evitada com a expansão do sistema em estudo. Ao expandir o sistema, inclui-se na análise os impactos do produto secundário gerado da função exportada (EKVALL E FINNVEDEN, 2001).

Muitas vezes, para determinado processo de fabricação, há várias abordagens de prevenção da poluição que podem ser aplicadas isoladamente ou em combinação. A escolha daquela dita mais eficiente e de menor custo pode vir a ser um desafio, já que o processo de tomada de decisão envolve equilíbrio entre os aspectos econômicos e ambientais.

3.2.2. Estudos de Avaliação Ambiental do Aço

A literatura técnica reúne diversas publicações que descrevem impactos ambientais associados ao processo de produção de aço, e práticas, condutas e ações que tenham sido implementadas pelo setor para redução desses efeitos. Nos estudos encontrados sobre o tema percebe-se certa falta de abrangência e, em alguns casos, de detalhamento técnico e de ordem metodológica. Segundo Salmi e Wierink (2011) tais omissões podem estar relacionadas a aspectos de confidencialidade exigidos pelas empresas. Estes autores relatam um estudo de caso sobre os efeitos da utilização de lama e pós da indústria siderúrgica em indústria de conversão de ferro e zinco na Pegada de Carbono na região do Golfo da Bósnia. No processo do aço o impacto da recuperação desses rejeitos gera reduções da ordem de 32 kg CO_{2eq}/t de aço bruto; entretanto nota-se aumento da emissão de carbono equivalente da indústria de conversão. Os autores deixam claro a dificuldade de realização de trabalhos visto a falta de banco de dados e informações cedidas pelas empresas.

Grande parte das publicações se restringiu a uma etapa, ou equipamento, específico da cadeia de transformação, como extração de recursos naturais ou Altos Fornos; ou seja, baseada em abordagem do tipo '*gate-to-gate*'. Norgate e Jahanshahi (2011), por exemplo, analisam a etapa de mineração e a produção de aço, sendo um dos focos do trabalho identificar possíveis formas de redução do consumo energético. Os autores enfatizam que 70 % da energia despendida na mineração se dá na cominuição do minério. Entretanto, ao olharem a cadeia produtiva como um todo, estes pesquisadores notaram ser esse desempenho discreto frente àquele demonstrado na produção de aço. Para corroborar esta conclusão Norgate e Jahanshahi (2011) destacam que um aumento de 50 % na eficiência energética na cominuição resulta um impacto sete vezes menor que na produção de aço. Os autores defendem que para o status tecnológico atual, cerca de 15.000 PJ/ano energia podem ser economizados no processo de produção do aço, e que para o ano de 2030 esta economia pode chegar a 30.000 PJ/ano. Para atingir a tais níveis de redução os pesquisadores sugerem alternativa como: uso de carvão vegetal como biomassa e granulação a seco de escória.

Massagie *et al.* (2013) investigaram apenas o processo que ocorre nos Altos Fornos, ao comparar a redução na Pegada de Carbono da produção de eletricidade através de gás de Alto Forno para diferentes procedimentos de tratamento das multifuncionalidades. No estudo

foram utilizadas alocação econômica e expansão de fronteiras, cujas aplicações resultaram em reduções de respectivamente, 0,91 e 0,41 kg CO_{2eq}/kWh. Massagie *et al.* (2013) concluem que o uso de alocação deve ser transparente, explícito e claro, uma vez que esta opção pode alterar os resultados finais de um trabalho.

Yellishetty, Mudd e Ranjith (2011) destacam que a aplicação de ACV no setor mineral é relativamente nova e que os modelos disponíveis para quantificação de impactos em termos de depleção de recursos naturais são imprecisos. Os autores baseiam essa afirmação no fato dos indicadores de categoria disponíveis para a avaliação de impacto não levam em consideração aspectos do processo tais como crescimento da mineração e perda de qualidade das reservas.

De acordo com registros disponibilizados pelo US Energy Interational Administration (2013), o processo de fabricação de aço ocupa a segunda posição em nível mundial, em termos de consumo energético. Conforme apontam Vandebo, Bosch e Hellweg (2012) entre 6,0 – 7,0 % da geração antrópica de CO_2 é proveniente deste setor produtivo. Dado o perfil, grande parte dos estudos encontrados se restringiram exatamente a analisar consumo energético e emissão de GEE. A variável energética, inclusive, costuma ser expressa sob a forma de eletricidade e de consumo de carvão.

Norgate e Jahanshahi (2011), Norgate *et al*. (2012), Soupajarvi, Pongrácz e Fabritius (2013, 2014), tratam do impacto da utilização de combustíveis alternativos na redução da emissão de GEE. Já Dong *et al.* (2013, 2014) verificam sua redução em termo de simbiose industrial. Outros trabalhos de mesma natureza podem ainda ser citados: Haque e Norgate (2013) que avaliam emissão de GEE com foco na produção de ferro ligas utilizadas na Aciaria; e Zhang *et al.* (2012) que discorrem como práticas operacionais e performance podem reduzir as emissões de GEE.

Em uma linha ligeiramente distinta mas ainda dentro do âmbito de emissões de GEE, Ryman e Larsson (2006), avaliaram a influência da relação entre uso de sucata no processo e emissão de CO_2. A análise, que se estendeu ao longo de todas as etapas da siderurgia até a obtenção de aço líquido - ou seja, um estudo baseado em abordagem do tipo *'cradle-to-gate*' - concluiu que a adição de percentagens crescentes de sucata nos Convertedores entre 0 % e 50 %, faz com que a emissão de CO_2 varie de 1,36 a 2,02 t CO_2/ t aço líquido. Destaca-se porém que as considerações sobre as premissas adotadas não estão claramente discutidas. No mesmo

enfoque, Wang, Ryman e Dahl (2006) analisaram como o mix de material metálico influencia o consumo de energia e as emissões de CO_2 do aço líquido. Muito embora o fluxo de referência da análise compreenda uma quantidade finita de aço líquido, a análise limitou-se quanto ao escopo, apenas a Altos Fornos e Convertedores. De qualquer forma, o diagnóstico inicial para este sistema, quando submetido a 100 % de pelotas no Altos Forno e até 20 % de sucata nos Convertedores, projeta emissões de 1,25 t CO_2/ t aço líquido.

Dentro do universo analisado, apenas em três oportunidades – Burchart-Korol (2013), Tian, Zhu e Geng (2013) e Norgate e Jahanshahi (2011) – a carga ambiental associada à energia elétrica foi verificada ao longo de todo o ciclo de vida; ou seja, avaliando impactos tanto na geração, como no transporte. No estudo de Burchart-Korol (2013) para a produção de aço na Polônia, por exemplo, o consumo de eletricidade foi responsável pela emissão de 209 kg de CO_{2eq}/ t aço bruto lingotado.

Somente Gorlov *et al*. (2009) fazem menção, ainda que breve, ao consumo energético na etapa de extração de carvões, cujos valores citados atingem 125 TWh/ano para cominuição do carvão. Os demais estudos não deixam claro se os impactos ambientais associados à matriz elétrica e à extração de carvões foram de fato contemplados, apesar de sempre referenciarem ACV do berço-ao-túmulo para embasar os trabalhos. As soluções usadas – ou seja, classes de ações que o setor de produção de aço realiza: de controle ambiental ou prevenção da poluição – abordam principalmente a prevenção da poluição, corroborando e, logicamente, ampliando o espectro de ação dos avanços do setor em termos de controle ambiental para atender aos requisitos e limites legais fixados para suas operações. Além disso, os elevados custos de processo motivam essas mesmas organizações a elevarem suas eficiências de conversão de matérias-primas em produtos finais, racionalizando usos e reduzindo perdas de processo. Todos os estudos se enquadram na classe de ações ditas de Reaproveitamento, que é postulada pela Produção mais Limpa (UNEP-UNIDO, 2010).

Em parte dos estudos essa prática foi expressa em termos de substituição de fontes de energia; já em outras situações, a solução de ‘consenso’ recaiu sobre mudança de fonte de matéria-prima mineral. Outras publicações exploraram melhorias de processo/tecnologia de produção; nesses casos, foram identificadas também análises que tratavam de substituição de fontes de matéria-prima mineral, e de melhoria de processo simultaneamente.

Norgate e Jahanshahi (2011), Norgate *et al.* (2012), Soupajarvi, Pongrácz e Fabritius (2013, 2014) discorrem sobre a utilização de biomassa, na forma de carvão vegetal, como alternativa, ainda que de aplicação parcial, ao uso do Coque Metalúrgico. Sabe-se que o consumo de Coque Metalúrgico contribui para elevada emissão de GEE na produção de aço. A substituição do coque pelo carvão vegetal advindo da biomassa poderia reduzir essas emissões uma vez que a biomassa vem com crédito de carbono devido ao sequestro de carbono na fase de sua formação. Sampaio (2005) registrou inclusive uso de cerca de 7,90 Mt carvão vegetal no Brasil em 2004. No entanto, muito autores defendem que a substituição plena de coque por carvão vegetal no processo dos Altos Fornos seja tecnicamente inviável. Atualmente, estudos relatam ser viável fazer reposição do ativo fóssil acima de 20 % (Norgate e Jahanshahi, 2011; Norgate *et al.*, 2012). Partindo desse pressuposto Souparjarvi, Pongrácz e Fabritius (2014) projetam que para o nível de produção atual, cerca de 276 kt de coque seriam economizadas por ano, além de haver redução de emissão de CO_2 variável entre 1,30 e 1,40 Mt/ano como crédito de subprodutos, a partir da implementação de 30 % de carvão vegetal ao processo.

Em estudo semelhante, Norgate e Jahanshahi (2011) estimaram em até 500 kg/t aço a taxa de redução de emissões de CO_2 com uso de 20 % de carvão vegetal na base energética dos Altos Fornos. No entanto, apenas Norgate *et al.* (2012) foram além dos limites de bateria do processo em uma análise dessa natureza, ao incluírem nas contabilizações impactos associados às etapas de cultivo e transporte de biomassa que também estão associadas a esse potencial benefício.

Moya e Pardo (2013) verificaram em detalhe, os efeitos que adoções de práticas baseadas nos conceitos de Best Available Technologies (BATs) e Innovative Technologies (ITs) têm sobre a redução de emissão de CO_2 e consumo energético em processos na Europa. BATs são tecnologias já disponíveis para implementação enquanto as ITs estão em desenvolvimento. Ambas, porém, tem enfoque de prevenção da poluição. Na análise em questão os autores avaliaram emissões e consumos para diferentes períodos de payback após investimento nessas tecnologias tomando como base o ano de 2030. Como resultado desse esforço Moya e Pardo (2013) identificaram comportamento não linear na relação entre taxa de payback e emissão de CO_2, muito embora os resultados obtidos tenham sido muito expressivos em termos de redução. Para uma taxa de payback de dois anos, a redução de CO_2 poderia chegar a 20 %, enquanto para um payback de 6 anos essa redução poderia variar entre 50 % – 65 %. Os

autores alertam porém para o fato de que algumas ITs estariam disponíveis apenas a partir de 2020, casos de Carbon Capture and Storage (CCS) e de Ultra Low Carbon Dioxide with Direct Reduction (ULCORED), método que preve redução direta de granulados e pelotas. Além disso, destacam serem todas as soluções propostas nesse segmento motivadas por limitações de padrões ambientais legais ou para redução de custo.

O reúso de escória é outro tema recorrente na literatura que relaciona práticas de processo a melhorias de desempenho ambiental. Nesse campo, destaca-se um estudo elaborado por Chen, Yang e Ouyang (2011) no qual são comparados quatro cenários de beneficiamento de escória e sua posterior reutilização na Sinterização e Convertedores na China. Os autores verificaram reduções de impacto em todas as possibilidades analisadas, sendo que o montante variou entre 2,10 e 2,40 kg CO_{2eq}/kg aço.

O grau de envolvimento de agentes externos ao processo é também explorado na literatura técnica. Nesse segmento, notou-se haver referência a participação de stakeholders que em todos os artigos levantados. Esta constatação não pode ser classificada como trivial dado os rigor, sigilo, e até conservadorismo que caracterizam o setor siderúrgico. Nesta linha, uma questão que merece destaque no mesmo campo é a das parcerias técnicas entre as empresas e fornecedores de matérias-primas, estabelecidas com o intuito de distribuir insumos de qualidade e grau de pureza elevada com vista a melhorar a eficiência do processo. Exemplos dessas relações aparecem nas produções de Norgate e Jahanshahi (2011), e Norgate *et al.* (2012), Soupajarvi, Pongrácz e Fabritius (2013, 2014) em que produtores agrícolas se associam às empresas produtoras de aço para fornecimento de biomassa a ser utilizada em substituição ao Coque Metalúrgico. Não foi encontrada porém, qualquer referência quanto ao uso de análise de desempenho ambiental como critério para seleção desses mesmos provedores.

Percebeu-se também o envolvimento de organizações que se interessam em adquirir ou fornecer materiais rejeitados para processo siderúrgico. Um exemplo disso aparece descritos em Dong *et al.* (2013; 2014) na forma de relatos sobre simbiose industrial e urbana de usinas produtoras de aço em Kawasaki/Japão. Dentre as práticas adotadas por aquelas organizações figuram a reciclagem de sucata e plásticos descartados nos Convertedores e Altos Forno, respectivamente. Para a reciclagem de sucata o estudo destaca uma redução 6,30 t CO_{2eq}/t sucata utilizada e para o uso de plásticos uma redução de 3,47 t CO_2/t plástico utilizado.

4. MÉTODO DE TRABALHO

A fim de atender de maneira satisfatória aos objetivos a que se propôs originalmente, este estudo foi estruturado na forma das seguintes ações operacionais:

a) Revisão bibliográfica: esta etapa compreendeu ao levantamento junto à literatura técnico-científica de produções capazes de delimitar o estado em que se encontra hoje a avaliação de desempenho ambiental do processamento de aço, bem como, de fornecer dados e informações relativas a este processo produtivo;

b) Concepção de modelo produtivo: que consistiu no levantamento de dados primários junto a uma indústria de grande porte do setor siderúrgico brasileiro para representação da condição tecnológica média do processo no nível de consumo de recursos e geração de rejeitos que a ele estão associados. Para os casos em que não foi possível implementar essa forma de coleta, foram recolhidos dados secundários, junto também à literatura técnica pertinente disponível (artigos científicos e bancos de teses e dissertações), e a bancos de dados internacionais de inventários de ciclo de vida disponíveis em *software* de simulação específico da área;

c) Determinação do perfil de impactos ambientais associado à produção de aço líquido via ACV: elaborou-se um diagnóstico inicial quantitativo, do desempenho desse processo em termos de seus impactos ambientais. A técnica de ACV foi aplicada segundo o enfoque metodológico previsto na norma ABNT NBR ISO 14044 (ABNT 2009) e, por isso, compreendeu as seguintes etapas:

    i. Definição do escopo do projeto para o sistema em análise: elaborou-se modelo representativo da tecnologia média praticada no Brasil para produção de aço líquido, delimitando o sistema de produto a ser estudado. Definiu-se também o fluxo de referência a ser tratado, assim como outros elementos estruturais necessários para formulação do diagnóstico, tais como a cobertura geográfica, temporal e tecnológica considerada. Determinou-se os critérios de exclusão e alocação, assim como selecionou-se os métodos de avaliação de impacto. Dada a complexidade do sistema em estudo esta verificação contemplou mais de um método de avaliação de impacto.

    ii. Adequação dos dados primários e secundários levantados ao escopo escolhido para o processo: harmonização dos dados que representam correntes de entrada

e saída de massa e energia ao fluxo de referência na forma de um Inventário de cargas ambientais para a produção de Aço Líquido. Até esta etapa de processo o fluxo de produção é relativamente comum a todos os produtos que possam ser gerados pelos processamentos siderúrgicos.

iii. Avaliação dos Impactos Ambientais: os consumos e emissões associados ao processo tiveram suas contribuições para problemas ambientais contemporâneos quantificadas através dos método e categorias de impacto solecionados.

d) Hierarquização dos efeitos adversos associados ao processamento de aço líquido: de posse da avaliação dos impactos ambientais foi então possível hierarquizar as etapas de processo em função de suas contribuições para tais desdobramentos;

e) Seleção das alternativas de solução dos problemas identificados: tendo como base à hierarquização dos efeitos associados ao processamento de aço líquido selecionou-se alternativas que, ao menos em primeira instância, fossem de fato capazes de reduzir os efeitos adversos sobre o ambiente. Para tal, foram considerados quatro critérios definidos, nos quais as soluções deveriam ser: i) operacionalmente factíveis, ii) economicamente viáveis, iii) atuar simultaneamente em diferentes problemas ambientais e iv) respeitar a expectativa da empresa;

f) Dimensionamento de soluções: as alternativas de melhoria foram a seguir especificadas e dimensionadas. Esta ação gerou readequação do inventário de consumos e emissões do sistema para cada situação sugerida;

g) Verificação da efetividade, em termos de melhoria de desempenho ambiental, das soluções propostas via aplicação de ACV: alterando-se os fluxos de entrada e saída de massa e energia dos novos inventários, a validade ambiental foi testada utilizando novamente a técnica de ACV. Analisou-se as mudanças ocorridas nos resultados de desempenho ambiental em cada qual dos cenários propostos a partir da aplicação dos mesmos métodos, e de suas respectivas categorias de impacto, usados na avaliação de impacto para o diagnóstico inicial.

h) Análise de resultados e conclusões finais: os resultados obtidos de cada análise foram verificados de maneira discreta e independente para que o produto das ações propostas fosse avaliadas com maior rigor. Esta reflexão resultou em conclusões e considerações

finais ao estudo quanto à implementação de ações de melhoria sobre o ciclo produtivo do aço líquido.

5. DIAGNÓSTICO DE DESEMPENHO DA PRODUÇÃO DE AÇO LÍQUIDO

A análise do desempenho ambiental do aço líquido será formulada e apresentada neste capítulo. Para tanto, levou-se em consideração condições de processamento real para uma produção média de uma planta localizada em território nacional. O aço líquido foi selecionado para o desenvolvimento da análise, pois até esta etapa de processo o fluxo de produção é relativamente comum a todos os produtos que possam ser gerados pelos processamentos siderúrgicos. A partir dai a análise passa a estar condicionada ao tipo de produto final a ser gerado e, por conta disso, especificidades em termos de composição, ligas utilizadas, rotas de refino, acabamento final, são naturalmente introduzidas.

São descritos em detalhes neste capítulo: o objetivo e escopo da ACV com suas respectivas definições e premissas; o inventário do ciclo de vida (ICV) da produção de aço líquido e, por fim, a avaliação dos impactos ambientais deste processo, com o intuito de fomentar as análises e discussões posteriores.

5.1 Definição de Objetivo e Escopo

Este estudo baseou-se na estrutura metodológica descrita pela norma ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2009). A técnica de ACV foi aplicada segundo enfoque atribucional para um escopo do tipo “berço-ao-portão”.

5.1.1 Definição de Objetivo

O objetivo deste estudo de ACV consiste de avaliar o desempenho ambiental de tecnologia média de produção de aço líquido praticada no Brasil.

5.1.2 Definição de Escopo

a) *Fluxo de Referência (FR):* O valor do fluxo de referência (FR) foi estabelecido como sendo de 1,0 kg de aço líquido produzido;

b) *Tipo e Qualidade dos dados:* Quanto ao tipo, os dados que expressam consumos e gerações relativos à manufatura do aço líquido foram modelados a partir de parâmetros coletados ‘*in loco*’ junto a um processo de produção com tais características (ou seja: dados primários). Por outro lado, correntes de matéria e energia vinculadas aos estágios de extração e transporte de matérias-primas – minério

de ferro, carvão/antracito, manganês, aditivos, além de outros insumos metálicos adicionados ao processo – foram representadas por meio de dados secundários recolhidos em publicações científicas, documentos técnicos, e em bancos de dados de apoio a estudos de ACV. Para casos dessa natureza foram aplicados procedimentos de tratamento e validação com o intuito de uniformizar a consistência de tais parâmetros com relação à dos dados primários. Isso ocorreu também com as utilidades de processo – água, energia elétrica e gás natural –, óleo diesel e transportes. Não foram consideradas as cargas ambientais dos bens de capital.

A *Qualidade dos dados* está descrita em função de três dimensões, a saber: Cobertura Temporal, Geográfica e Tecnológica. No que se refere à *Cobertura Temporal* os dados primários procedem de levantamentos sucessivos realizados em uma planta, ao longo dos doze meses do ano de 2012. Este horizonte temporal foi selecionado por representar de maneira satisfatória a condição típica de operação daquele arranjo. Para os demais dados respeitou-se a cobertura temporal original associada às fontes ou bancos de dados selecionados para composição do modelo. Quanto à *Cobertura Geográfica*, as etapas relativas à manufatura do aço líquido em si advêm de unidade instalada no estado de São Paulo. Já no que tange à origem das matérias-primas, o minério de ferro – *sinter feed*, granulado *in natura* e pelotas – procede em sua maior parte do Quadrilátero Ferrífero, região localizada no centro-sul do estado de Minas Gerais, e que compreende, entre outros, os municípios de Congonhas, Sabará, Santa Bárbara, Mariana, Ouro Preto, João Monlevade, Rio Piracicaba, Itaúna e Itabira. Por outro lado, o carvão mineral é, em sua quase totalidade, importado. Os principais fornecedores para o ano de 2012 foram Estados Unidos, Colômbia, Austrália e Rússia. O antracito procede da Ucrânia e o Coque Verde de Petróleo (CVP) é adquiro de empreendimento instalado na região de Paulínia (SP). O mesmo ocorre com manganês, calcário, cal fina e dolomita que também são processados no Brasil. Finalmente, a *Cobertura Tecnológica* baseia-se na descrição apresentada anteriormente no Capítulo 3 – Seção 3.1.2 deste documento. O sistema de produto em que todas essas etapas aparecem interligadas está indicado na Figura 5.

c) *Critérios de Exclusão:* decidiu-se excluir as correntes cuja contribuição cumulativa em termos de matéria e energia fossem inferiores a 1,0 % do total de entradas em cada etapa ou processo elementar que constitui o sistema de produto. No entanto, cabe dizer que quando algum aspecto ambiental que originalmente estivesse enquadrado nesse

critério mostrou grau expressivo de relevância ambiental para o processo, procedeu-se sua reintegração imediata ao modelo, a despeito de seu enquadramento no requisito anterior, seguindo orientação da norma ABNT NBR ISO 14044 (ABNT 2009). O critério de relevância foi considerado em situações nas quais o impacto proporcionado por determinação de carga ambiental fosse motivado pela magnitude dessa contribuição em termos da referida categoria (ou seja, seu fator de impacto) e não necessariamente pela quantidade por ele aportada em termos de fluxo de referência no estágio em que é gerado ou consumido;

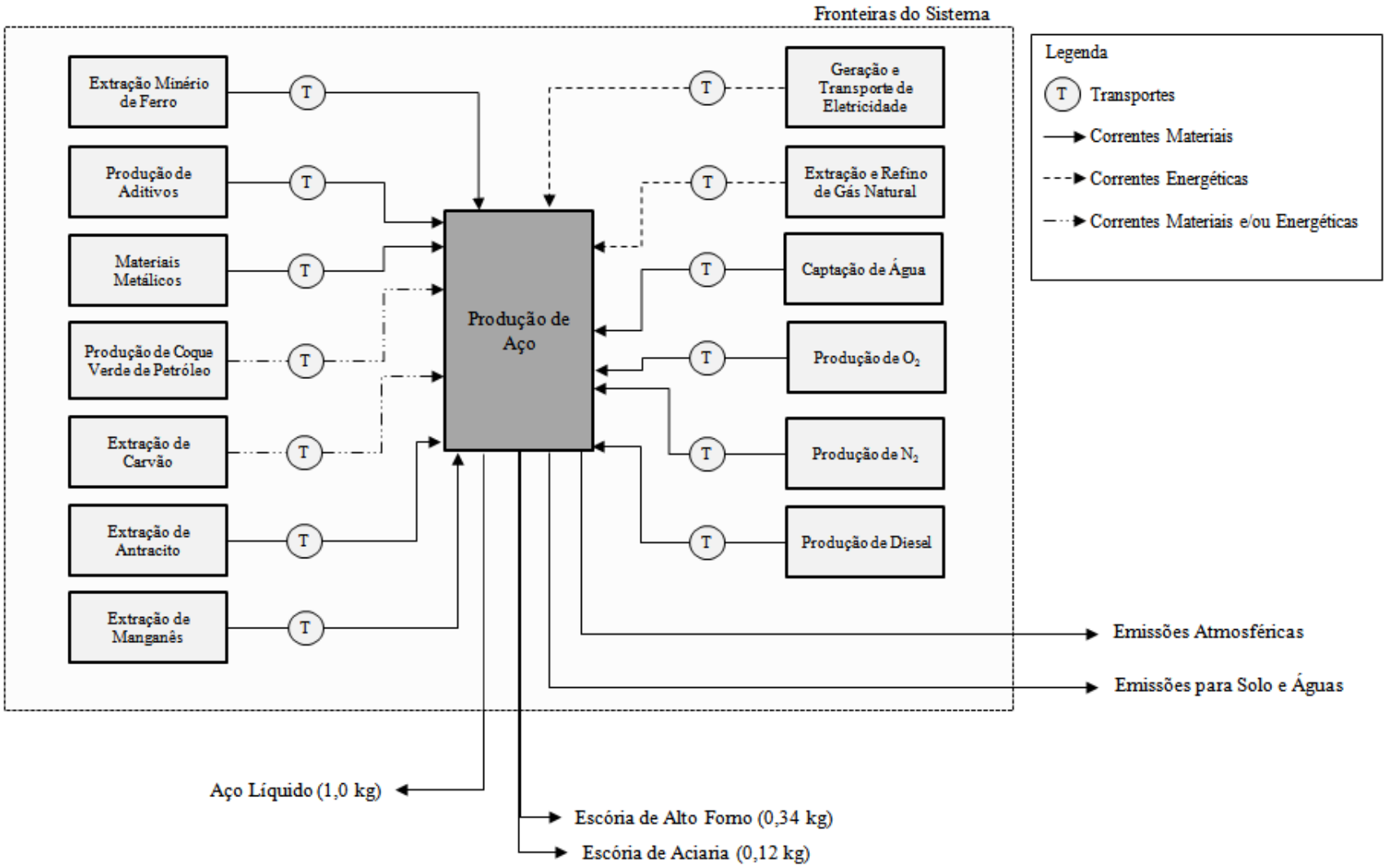
d) *Tratamento da Multifuncionalidade*: no processo em análise há multifuncionalidade entre aço líquido, escória de Altos Fornos, e escória de Aciaria. Para determinação do Perfil de Impactos do processo adotou-se como procedimento para tratamento desta situação o Método de Excesso (ou '*Surplus Method'*) (HEIJUNGS E SUH, 2002; SUH *et al.*, 2010). No entanto, a fim de verificar os efeitos dessa decisão metodológica sobre os resultados obtidos para o estudo, tratou-se também esta multifuncionalidade por meio de Alocação. Nessa situação aplicou-se tanto o Critério Mássica como Econômico. Em outra situação de multifuncionalidade se justificou aplicar o procedimento de alocação. Esta se refere ao refino de petróleo para obtenção de óleo diesel e do Coque Verde de Petróleo. Aqui, fez-se uso do critério energético, por meio do que atribuiu-se ao diesel e ao CVP respectivamente 22 % e 6,0 % das cargas ambientais pregressas associadas a este ramo do processo;

e) *Métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) e Categorias de Impacto:* A utilização de métodos de avaliação de impacto é um procedimento que traduz os dados numéricos do inventário em resultados ambientalmente relevantes (SAADE *et al.*, 2014). A avaliação de impactos da produção do aço líquido ocorreu em dois níveis complementares. No primeiro deles, voltado para verificação de efeitos em termos de consumo de recursos energéticos empregou-se o método Cumulative Energy Demand (CED) - v 1.09 (FRISCHKNECH *et al*., 2007). O CED investiga a energia utilizada em todo o ciclo de vida de um produto ou serviço. Os dados associados a este método levam em consideração o poder calorífico inferior ou superior que portadores de energia primária renovável e não renovável retiram da natureza. As categorias de impacto consideradas nesta abordagem foram: Fósseis Não Renováveis (NRF), Nuclear Não Renovável (NRN), Biomassa Não Renovável (NRB), Energia decorrente

de efeitos naturais (Vento, Sol e Geotermia) (RWSG), Água Renovável (RW) e Biomassa Renovável (RB).

O segundo nível de avaliação de impacto quantificou efeitos em termos de emissões a partir da aplicação do método ReCiPe Midpoint (H) V1.12 (GOEDKOOP *et al.*, 2013) para impactos de Mudanças Climáticas (CC), Formação de Oxidantes Fotoquímicos (POF), Acidificação Terrestre (TA), e as Depleções de Água e de Metais (WD e MD). ReCiPe é um método clássico de avaliação de impacto que minimiza incertezas e agrupa os resultados em categorias de impacto intermediárias *(midpoints)*. É um método orientado de causa e efeito. (SAADE *et al.*, 2014). Complementarmente a essa análise procedeu-se ainda uma avaliação de impactos relativos a toxicidade. Para tanto, fez-se uso do método USEtox – v 1.04 (HUIJBREGTS *et al.*, 2010) para as categorias de Toxidade Humana Cancêr (HT_c), Toxidade Humana Não Cancêr (HT_{NC}) e Ecotoxidade Aquática (FEC). O USEtox avalia tão-somente impactos em termos de ecotoxidade aquática e toxidade humana. Sua lógica de aplicação baseia-se em analisar efeitos da emissão de químicos para o meio ambiente que sejam responsáveis por estabelecer relações de causa e efeito de três níveis: destinação ambiental, exposição e efeito. Para tanto, USEtox considera a emissão desses contaminantes para água, bem como suas potenciais ingestão e inalação pelo ser humano. Os efeitos dessas ações sobre a biota e a população – nesse caso em termos de câncer e outras enfermidades – são estimados via determinações de laboratório.

Figura 5 - Sistema de Produto e respectivas fronteiras – Diagnóstico Inicial



5.2 Inventário de Ciclo de Vida (ICV) da produção de aço líquido

A Tabela 2 descreve em linhas bastante gerais o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) da produção de aço líquido.

Tabela 2 - Inventário simplificado da produção de 1,0 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial.

Produto	
Aço líquido (kg)	1,00
Entradas Materiais	
Minério de Ferro (kg)	1,47
Carvão mineral e CVP (kg)	6,80E-01
Antracito (kg)	4,90E-02
Minério de Manganês (Mn) (kg)	4,70E-02
Materiais e aparas metálicas (kg)	1,10E-02
Aditivos de processo (kg)	3,50E-01
Oxigênio líquido ($O_{2(l)}$) (kg)	4,40E-02
Nitrogênio líquido ($N_{2(l)}$) (kg)	3,90E-02
Água de processo (L)	35,83
Óleo Diesel (L)	6,0E-04
Instalações e equipamentos (P)	1,33E-11
Entradas Energéticas	
Gás Natural (MJ)	7,70E-01
Eletricidade (kWh)	1,90E-01
Saídas	
Emissões para o Ar	
Dióxido de carbono (CO_2) (fóssil) (kg)	1,25
Monóxido de carbono (CO) (fóssil) (kg)	6,00E-04
Energia residual (calor) (MJ)	9,69E-01
Óxidos de Nitrogênio (expresso como NOx) (kg)	3,30E-04
Óxidos de Enxofre (expresso como SOx) (kg)	3,00E-04
Compostos Orgânicos Voláteis (kg)	3,00E-05
Material particulado, $\varphi < 2.5$ µm (kg)	2,20E-04
Monóxido de Nitrogênio (kg)	1,79E-04
Rejeitos para tratamento	
Restos metálicos de processo - aterro sanitário (kg)	1,18E-02

A entrada material de ‘Minério de Ferro’ contempla diferentes tipos de minérios, a saber: *sinter feed*, minério granulado e pelota. Para efeito de cálculo as características de entrada material dos granulados e pelota foram consideradas semelhantes ao dos minérios *sinter feed*. O fluxo de ‘Carvão Mineral’ se compõe, além do carvão mineral em si, também da corrente material composta pela matéria-prima carbonosa Coque Verde de Petróleo. Tal como para o ‘Antracito’ e o “Minério de Manganês”, os valores totalizados de cada agrupamento citado anteriormente são oriundos de múltiplas procedências.

Já aquela apresentada como ‘Aditivos de processo’ compreende as somatórias de consumos de dolomita, nefelina, calcário e cal fina – usados em diferentes partes do processo como fundentes –, e escória sintética – usada como escorificante na Aciaria. Por fim, os ‘Materiais e aparas metálicas’ se compõe de alumínio (nas formas granulada, de vergalhões e lingotes) empregado como agente desoxidante e sucatas metálicas, ambos utilizados na Aciaria.

O consumo de água traz associadas ações de recalque e tratamento, quando esse se fez de fato necessário. As distâncias de deslocamento compreendidas entre os corpos hídricos desde onde a água é captada e a unidade fabril foram estimadas em 1000 m para efeito de modelagem de transporte por tubulação.

O consumo de energia elétrica da planta de processamento de aço é suprido em cerca de 80 % pela rede concessionária. A geração deste ativo foi modelada a partir de dados contidos no Balanço Energético Nacional (BEN) para o ano base de 2012 (EPE, 2013). O valor registrado no ICV não leva em conta porém consumos elétricos do recalque de água, que foi quantificado separadamente.

Assim como já havia sido indicado na Figura 5, o óleo diesel é consumido no processo como fluxo de matéria, razão pela qual inclusive, o valor de sua participação encontra-se registrado em litros. Os modelos desenvolvidos para representar as operações de transporte terrestre (rodoviário e ferroviário) e transoceânico basearam-se em distâncias reais. No entanto, os veículos utilizados em cada deslocamento foram selecionados a partir de bancos de dados.

5.3 Resultados e Discussão - Diagnóstico Inicial

O processo de produção do aço líquido traz atrelado a seu fluxo de produção etapas de processos que lhe são inerentes, e outras, a ele externas. Consideram-se inerentes aquelas etapas ditas do ‘intramuros da usina’ e que são diretamente ligadas ao processamento do aço,

a citar: processo relacionados à consumo de energia elétrica, consumo de gás natural, oxigênio, nitrogênio e diesel, captação e utilização de água e disposição de rejeitos. Por outro lado, são etapas externas aquelas em que não há ligação direta com a produção de aço líquido, como ocorre com extrações de matérias-primas. Esses processos transportam cargas ambientais de processos extramuros da usina para o processamento em análise.

5.3.1 Demanda Primária de Energia (PED) - Diagnóstico Inicial

A Tabela 3 descreve os valores PED associados à produção de 1,0 kg de aço líquido, enquanto a Figura 6 relativiza essas mesmas contribuições entre cargas inerentes ao processo e cargas a ele externas para cada categoria de impacto analisada neste mérito.

Figura 6 - Participação percentual de cargas externas e inerentes ao processo nos impactos energéticos – Diagnóstico Inicial

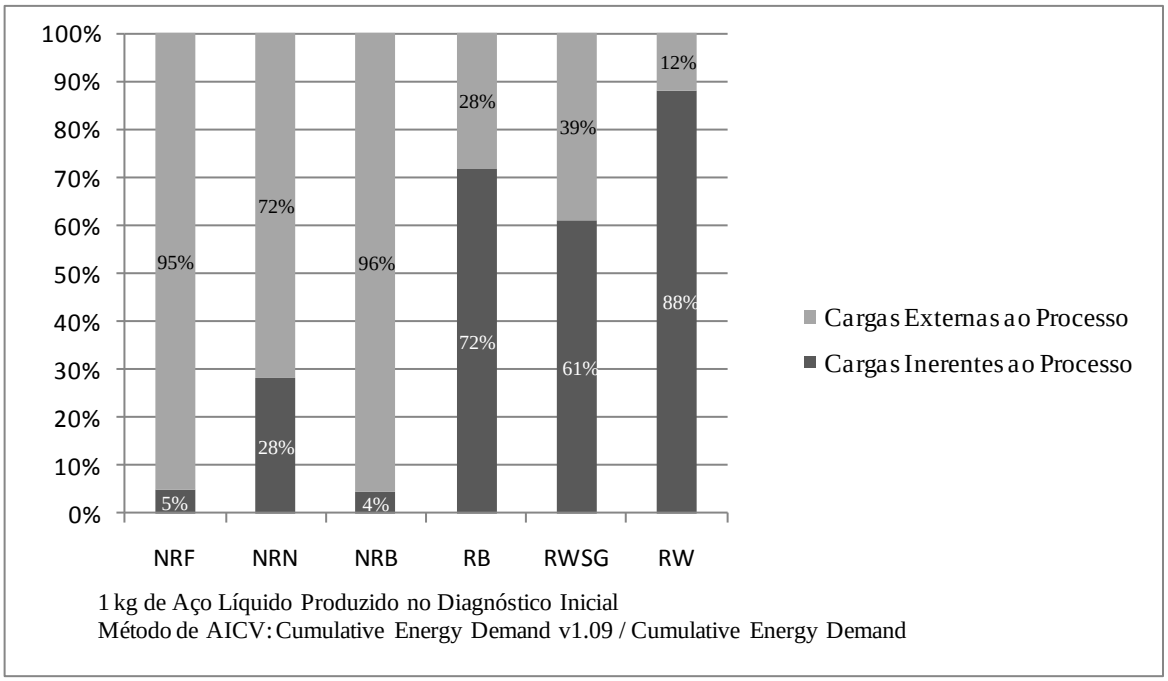


Tabela 3 - Avaliação de desempenho da produção de aço líquido em termos de Demanda de Energia Primária (PED) – Diagnóstico Inicial

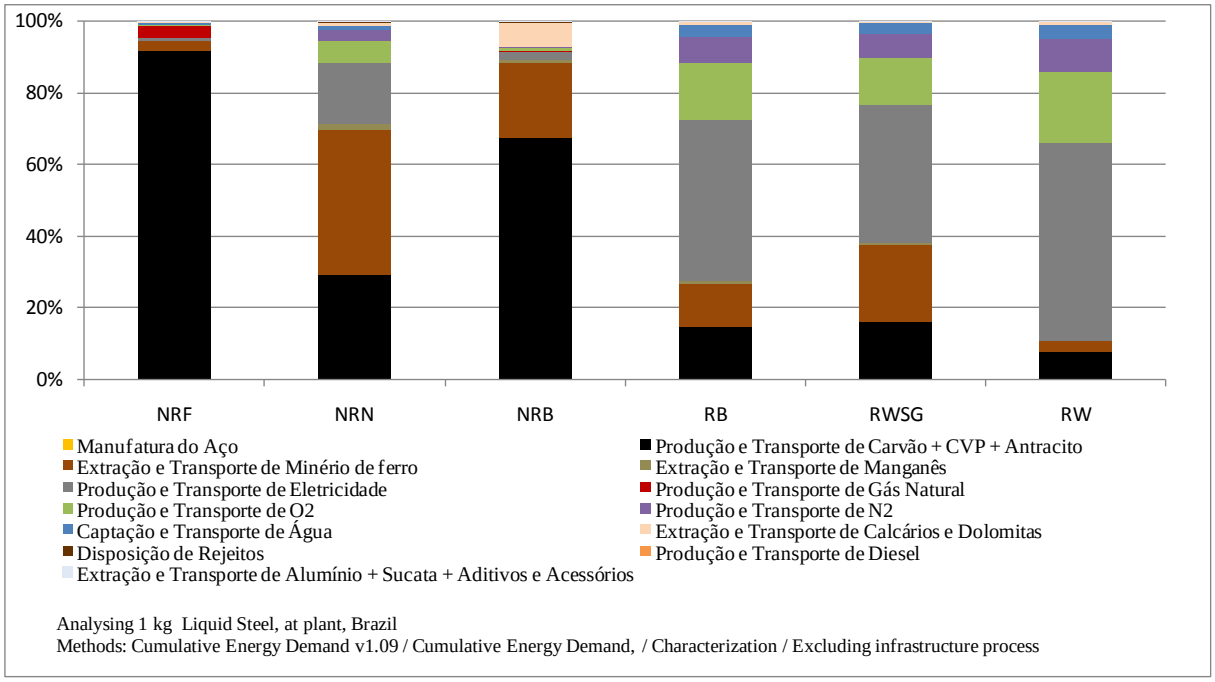
Categoria de Impacto	Unit	Total	Extração e Transporte de Carvão Mineral	Produção e Transporte de CVP	Extração e Transporte de Antracito	Produção e Transporte de Eletricidade	Extração e Transporte de Minério de Fe	Produção e Transporte de Gás Natural	Produção e Transporte de O_2	Produção e Transporte de N_2	Extração e Transporte de Calcários	Captação e Transporte de Água	Extração e Transporte de Dolomita	Extração e Transporte de Manganês	Produção Diesel	Disposição de Rejeitos	Extração e Transporte de Alumínio e Sucata	Transporte de Aditivos e Acessórios
NRF	MJ	25,63	14,87	7,40	1,31	2,33E-01	6,19E-01	8,62E-01	8,24E-02	3,91E-02	9,65E-02	1,77E-02	4,60E-02	2,62E-02	2,49E-02	1,42E-02	2,44E-03	6,23E-04
NRN	MJ	4,97E-01	1,07E-01	1,08E-02	2,54E-02	8,58E-02	2,04E-01	4,17E-05	3,03E-02	1,44E-02	8,52E-04	6,51E-03	1,49E-03	7,27E-03	3,58E-05	3,23E-03	6,06E-05	1,12E-05
NRB	MJ	4,63E-07	2,31E-07	5,70E-08	2,43E-08	1,10E-08	9,65E-08	8,87E-10	3,89E-09	1,85E-09	2,16E-08	8,37E-10	7,46E-09	3,48E-09	1,67E-10	2,08E-09	5,44E-10	2,65E-10
RB	MJ	5,55E-02	4,51E-03	2,71E-03	8,22E-04	2,49E-02	6,86E-03	2,37E-05	8,80E-03	4,17E-03	5,01E-05	1,89E-03	3,65E-04	2,86E-04	9,15E-06	3,18E-05	1,24E-05	3,20E-07
RWSG	MJ	1,82E-02	1,72E-03	7,71E-04	4,77E-04	6,96E-03	3,87E-03	2,90E-06	2,46E-03	1,17E-03	1,49E-05	5,28E-04	1,02E-04	1,46E-04	2,60E-06	1,11E-05	3,62E-06	1,46E-07
RW	MJ	1,05	1,84E-02	6,20E-02	2,92E-03	5,81E-01	2,98E-02	3,15E-04	2,05E-01	9,73E-02	3,59E-04	4,41E-02	8,25E-03	2,16E-03	2,10E-04	8,03E-04	2,79E-04	1,65E-06
Total	MJ	27,26	15,00	7,47	1,33	9,32E-01	8,63E-01	8,62E-01	3,29E-01	1,56E-01	9,78E-02	7,07E-02	5,62E-02	3,60E-02	2,52E-02	1,83E-02	2,79E-03	6,37E-04

As cargas externas ao processo tem intensa participação nas categorias de impacto NRF, NRN e NRB, enquanto as cargas inerentes predominam em termos de RB, RWSG e RW. As etapas de processo que aportam cargas a tais categorias podem ser visualizadas na Figura 7.

Devem merecer destaque nesse caso a extração e o transporte de materiais carbonosos e ferroso que acumulam entre 71 % e 95 % do total da demanda de energia nas categorias de impacto NRF, NRN e NRB.

Jás nas categorias de RB, RWSG e RW destacam-se contribuições associadas à geração e transporte de eletricidade, e produções de O_2, N_2 e água de processo.

Figura 7 - Perfil de impacto ambiental da produção de 1 kg de aço líquido obtido pelo Método CED – Diagnóstico Inicial



A categoria de impacto NRF apresenta expressiva participação (94 %) sobre o resultado total de PED. Destacam-se nesta situação contribuições sob a forma de depleção carvão, petróleo e gás natural, as quais perfazem, respectivamente, 54 %, 29 % e 3,4 % do total da categoria. No âmbito das participações por estágio do processo, os principais aportes em termos de NRF se associam as extrações e transportes de carvão mineral (58 %). A esta se seguem o refino de petróleo para a produção e o transporte de CVP (29 %) e, ainda que mais à distância, de antracito (5,1 %).

O carvão mineral representa a principal fonte de PED. Sua participação (15 MJ/kg aço) advêm de um consumo de 540 g/kg aço, dividido entre os suprimentos de matéria – como carbono (C) –, e energia para o processo. Segundo ANEEL (2008), o Brasil produziu em 2007 cerca de 2,2 Mt_{ep} de carvão mineral, os quais corresponderam a apenas 16 % das necessidades do país para o período. Além disso, em sua maioria o carvão mineral brasileiro não atende aos requisitos de qualidade requerida pelo processo, sobretudo por ser rico em cinza e enxofre (VIANA, 2007). Esses motivos justificam a necessidade recorrente de importação que, tal como indicado antes na Definição de Escopo, foi atendida a partir de suprimentos da Austrália, Colômbia, Estados Unidos e Rússia. Atualmente o único material carbonoso de procedência brasileira é o Coque Verde de Petróleo (CVP) que, como também já fora reportado, deriva da destilação do petróleo. Participações de PED associadas a produções de CVP ocorrem sob a forma de refino de petróleo (7,36 MJ/kg aço). Em 2010, o óleo cru procedeu em 79 % de reservas *offshore* localizadas na costa brasileira; o restante foi adquirido via importação (ANP, 2011). No total, a produção e o transporte dessa matéria-prima contribuíram com 7,47 MJ/kg.

Figuram por fim, ainda que com menor participação em relação aos demais estágios de processo (1,33 MJ/kg aço) as extração e transporte antracito. Este total está relacionado a um consumo de 48,6 g/kg aço o qual visa exclusivamente suprir parte da demanda energética no processo.

Muito embora os deslocamentos transoceânicos ocorram por extensões expressivas (Austrália: 14636 km e 14696 km; Colômbia: 7604 km; Estados Unidos: 9466 km; e Rússia: 12412 km) os consumos de combustível relativos a tais operações (que resultariam também em depleção de petróleo) foram discretos, perfazendo apenas 897 KJ/kg aço.

Diante dos resultados obtidos, decidiu-se proceder uma análise complementar à formulação do diagnóstico de desempenho energético da produção de aço líquido. Esta verificação se ateve a olhar, com maior nível de detalhes, demandas de energia primária relativa ao processamento em si do aço. Em termos práticos isso ocorreu por meio do isolamento das ditas etapas inerentes ao processo, o que é conseguido admitindo-se – apenas para efeito dessa estimativa – que insumos e matérias-primas empregados nas transformações externas ao processo fossem consideradas no que se chama no jargão da ACV de fluxos elementares, ou seja, que não trouxessem associadas quaisquer cargas ambientais. Mesmo que tenham sido mantidas as categorias de impacto outrora analisadas essa adequação gerou, logicamente,

outro perfil de desempenho energético para o sistema, o qual aparece indicado em diferentes níveis de detalhamento na Figura 8 e na Tabela 4.

Para as condições descritas acima, os impactos em termos de PED totalizaram 2,39 MJ/kg aço líquido, valor correspondente a 9,3 % dos impactos associados a todo sistema de produto. Esse desempenho chama a atenção pelo lado positivo, pelo fato de os processos siderúrgicos serem consagrados como energo-intensivos.

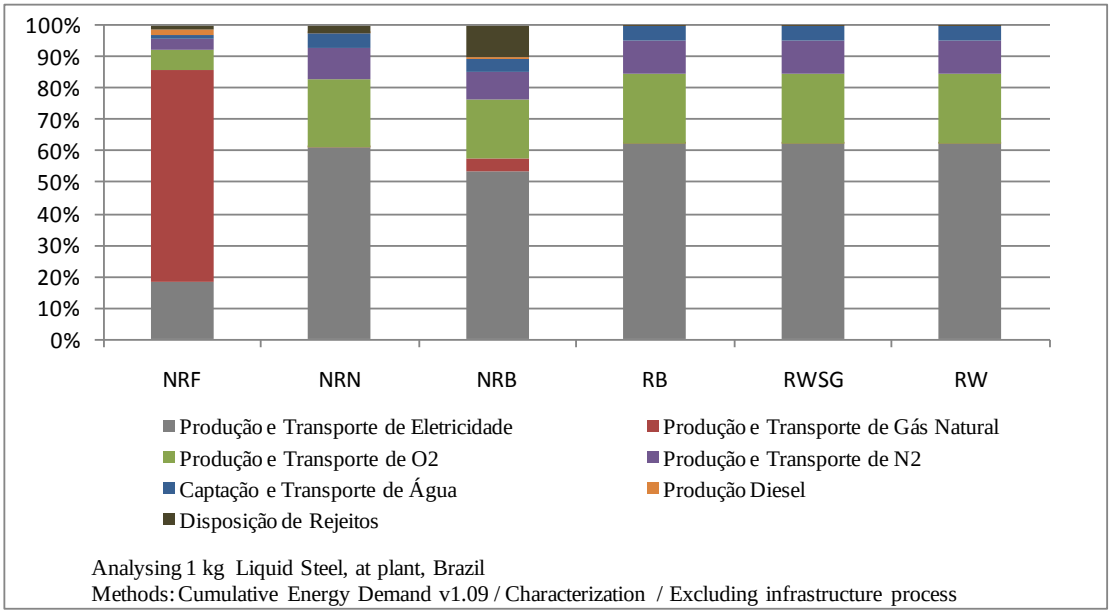
Quanto às principais etapas contribuintes, destaca-se a geração e transporte de energia elétrica cuja participação perfaz 39 % do valor acumulado, seguida, da produção e transporte de gás natural (36 %) e o processamento de O_2 líquido (14 %). Em termos de categoria de processo, a NRF é a categoria de impacto que tem a maior participação sobre o totalizado da demanda de energia, com 53,2 % do total. A esta categoria segue-se a RW, cuja participação totaliza 38,8%.

Tabela 4 - Avaliação de desempenho da produção de aço líquido em termos de Demanda de Energia Primária (PED) para Cargas Inerentes – Diagnóstico Inicial

Categoria de Impacto	Unit	Total	Produção e Transporte de Eletricidade	Produção e Transporte de Gás Natural	Produção e Transporte de O_2	Produção e Transporte de N_2	Captação e Transporte de Água	Produção Diesel	Disposição de Rejeitos
NRF	MJ	1,27	2,33E-01	8,62E-01	8,24E-02	3,91E-02	1,79E-02	2,49E-02	1,42E-02
NRN	MJ	1,40E-01	8,58E-02	4,17E-05	3,03E-02	1,44E-02	6,58E-03	3,58E-05	3,23E-03
NRB	MJ	2,07E-08	1,10E-08	8,49E-10	3,89E-09	1,85E-09	8,45E-10	1,67E-10	2,08E-09
RB	MJ	3,99E-02	2,49E-02	1,49E-05	8,80E-03	4,17E-03	1,91E-03	9,15E-06	3,18E-05
RWSG	MJ	1,11E-02	6,96E-03	2,90E-06	2,46E-03	1,17E-03	5,33E-04	2,60E-06	1,11E-05
RW	MJ	9,29E-01	5,81E-01	3,15E-04	2,05E-01	9,73E-02	4,45E-02	2,10E-04	8,03E-04
Total	MJ	2,39	9,32E-01	8,62E-01	3,29E-01	1,56E-01	7,14E-02	2,52E-02	1,83E-02

As etapas que mais contribuem para NRF são produção e transporte de gás natural (862 KJ/kg aço) e geração de eletricidade (233 KJ/kg). Juntas essas totalizam 86 % da participação para a categoria. No que tange a RW, segunda maior participação em termos de PED, a eletricidade voltou a se destacar com 63 % do impacto para esta categoria. Destes, a quase totalidade procede da geração hidroelétrica. Em seguida a esta destaca-se a produção de O_2 (22 % do total).

Figura 8 - Perfil de impacto ambiental apenas da produção em si de 1,0 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial



De maneira geral, a produção de eletricidade mostra ter contribuições significativas em todas as categorias de impacto que perfazem o perfil energético do processamento de aço líquido em si (Figura 8). Essa constatação abre a perspectiva para que dentre as soluções para melhoria de desempenho do referido arranjo produtivo, esteja incluída ao menos uma alternativa capaz de reduzir, ou mesmo e eventualmente até, minimizar essa dependência.

5.3.2. Impactos Ambientais Decorrentes de Emissões - Diagnóstico Inicial

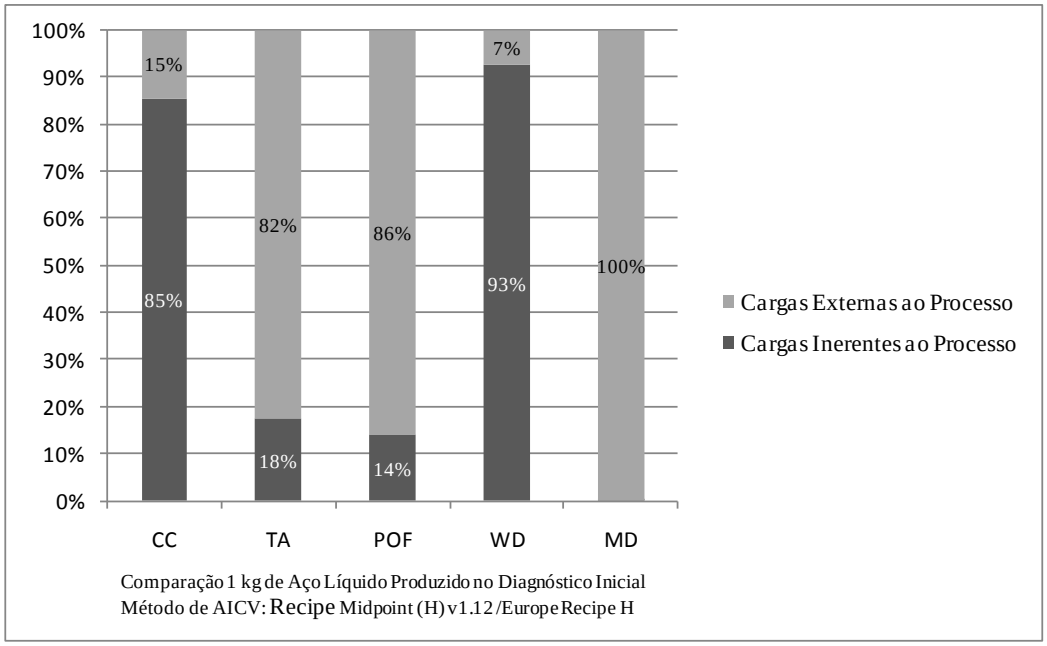
A Tabela 5 apresenta os resultados da aplicação dos métodos ReCiPe e USEtox para efeito de quantificação de impactos derivados de emissões originadas na produção de 1,0 kg aço líquido.

Tabela 5 - Perfil de Impactos Ambientais decorrentes de emissões da produção de 1,0 kg aço líquido

Método	Categoria de impacto	Unidade	Total
ReCiPe Midpoint (H)	CC	kg $CO_{2\ eq}$	1,56
	TA	kg $SO_{2\ eq}$	3,39E-03
	POF	kg NMVOC	3,47E-03
	WD	m^3	39,9E-03
	MD	kg Fe_{eq}	2,88
USEtox	HT_C	CTUh	4,04E-12
	HT_{NC}	CTUh	1,63E-13
	FEC	CTUe	8,56E-3

Da mesma forma que para o desempenho energético, os impactos derivados de emissões foram também relativizados entre processos inerentes e externos da cadeia produtiva, tal como aparece na Figura 9.

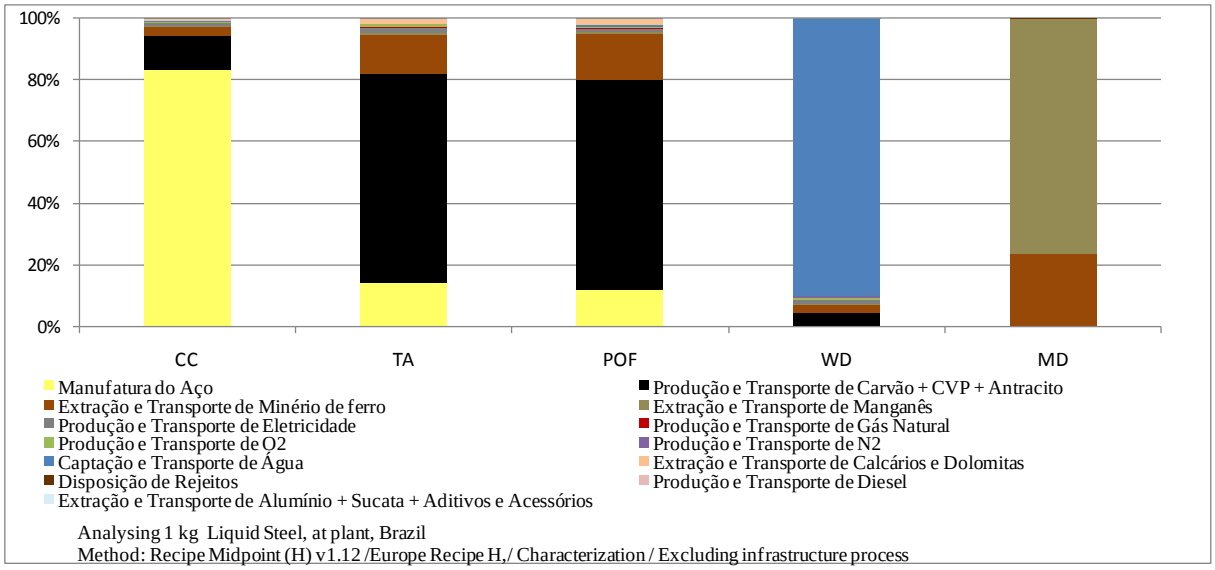
Figura 9 - Participação percentual de cargas externas e inerentes ao processo nos impactos proveniente de emissões da produção de 1,0 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial



As categorias de impacto em que prevalece a participação de etapas externas ao processo foram: TA, POF e MD. Já as etapas inerentes ao processo predominam em termos de CC e WD. A participação de cada etapa de processamento que compõe as cargas inerentes e externas pode ser visualizada na Figura 10.

A extração e transporte de materiais carbonosos e ferrosos – todas, etapas externas ao processo – geram principalmente impactos em TA, POF e MD e a intensa participação destas etapas na magnitude dos impactos. Em contrapartida, dentre os impactos de transformações inerentes ao processo destacam-se a manufatura do aço, prevalente em termos de CC, e captação de água que domina, como já poderia esperar, a categoria WD.

Figura 10 - Perfil de impacto ambiental decorrentes de emissões da produção de 1 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial



No que se refere a impactos de toxicidade, as etapas inerentes ao processamento contribuem de maneira decisiva para FEC (Figura 11), ao passo que HT_C e HT_{NC} tem sobressalência de aportes de transformações a ele incorporados. As contribuições para HT_C e HT_{NC} derivam, assim como já ocorrera com outros efeitos ambientais, de extração de materiais carbonos e ferrosos. Essas operações representam a quase totalidade das contribuições para as referidas categorias (66 % e 86 %) que aparecem indicadas na Figura 12.

Figura 11 - Participação relativa de cargas externas e inerentes ao processo nos impactos decorrentes de emissões – Diagnóstico Inicial

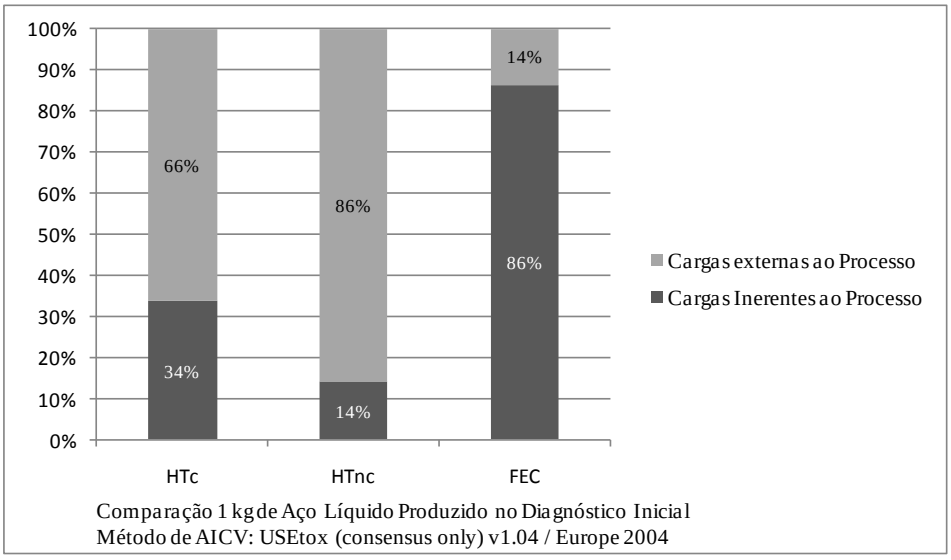
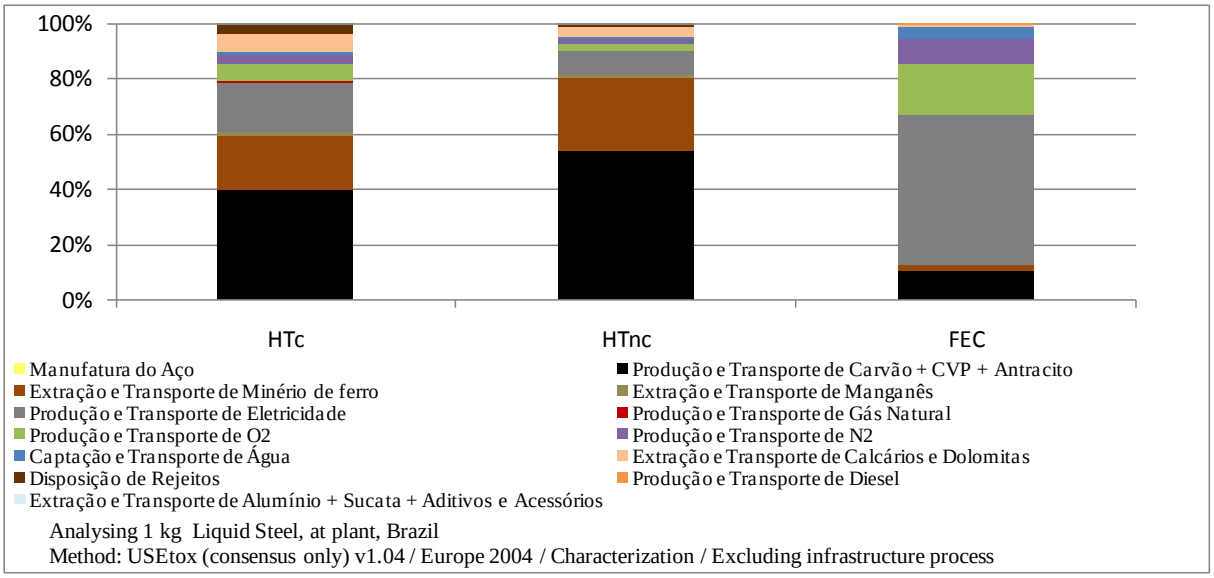


Figura 12 - Perfil de impacto ambiental referente a Ecotoxicidade e Toxicidade Humana decorrentes de emissões da produção de 1 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial



O resultado obtido em termos de CC (1,56 kg $CO_{2\ eq}$/kg aço líquido) mostra-se – em ordem de magnitude - aderente com os relatórios da Associação World Steel Corporation e Instituto Aço Brasil. Os principais precursores de CC são emissões de CO_2 e metano (CH_4), ambos de origem fóssil, cujos aportes representam respectivamente 92 % e 3,9 % do desempenho total para a categoria. O óxido de dinitrogênio (N_2O) aporta 3,6 % do total da categoria. Diagnosticou-se emissões de CO_2 fóssil em múltiplas operações da cadeia de produção do aço líquido. Dentre estas destacam-se: a manufatura do aço em si; transportes; os refinos de petróleo e gás natural; e a geração de energia elétrica.

A manufatura do aço líquido contribui no total com 84 % dos 1,56 kgCO_{2eq}/kg aço; o restante se origina da extração e transporte de materiais carbonosos e ferrosos (Figura 10). Em termos de precursores, a manufatura do aço contribuiu diretamente com 1,25 kg CO_2 /kg aço (87 % da emissão total de CO_2 do sistema). O desempenho se justifica pelo fato da quase totalidade das transformações associadas a esse processamento (coqueria, carboquímico, de sinterização, de regeneração, de produção de vapor em caldeiras, nos Altos Fornos, e no refino primário) fazer uso de energia térmica. Esta, de sua parte, procede de combustão de gás natural, assim como de materiais carbonosos (carvão e derivados de petróleo), processos dos quais o CO_2 é rejeito material.

As atividades de transportes respondem, em sua totalidade, por outros 8,4 % das perdas de CO_2. Destes, 59,5 g CO_2/kg aço são emitidos durante deslocamentos transoceânicos que ocorrem para importação de carvão mineral, antracito e manganês; 44,7 g/kg em transportes

ferroviários (também carvão e antracito, minério de ferro além de aparas metálicas e manganês); e 15,7 g/kg em transportes rodoviários (minério de ferro, calcário, cal, manganês, dolomita, aparas e CVP).

Foram observadas também perdas de CO_2 no refino de petróleo para efeito de produção CVP de 17,9 g/kg. Por fim, a matriz elétrica nacional contou, em 2012, com 13 % de fontes fósseis, dos quais 62 % advêm de gás natural, 26 % de petróleo e derivados, e o restante, de carvão (EPE, 2013). Juntas essas fontes contribuíram com 24,3g CO_2/kg para geração de energia termelétrica consumida no processo.

As emissões de CH_4 procedem em sua maior parte de mineração de carvão (1,87 g CH_4/kg aço). Destes, 60 % referem-se a produção de carvão ocorridos nos Estados Unidos, e outros 16% estão relacionados a produção de CVP. Finalmente, o processamento de antracito contribui com mais 460 mg CH_4/kg.

Os impactos ambientais relativos a TA foram causados em sua maior parte por emissões de SO_x (55 %) e NO_x (39 %). As perdas de SO_x estão ligadas a queima do óleo diesel para transportes transoceânico e ferroviário (resultaram em contribuições, respectivamente, de 890 mg/kg e 130 mg/kg), além do refino de petróleo para produção do CVP, (390 mg/kg).

Em parte, as emissões de NO_x seguem o mesmo padrão dos óxidos sulfurados, concentrando-se nos transportes transoceânicos (960 mg/kg) e ferroviário (260 mg/kg) também em função da queima de óleo diesel. Destaque-se nesse caso o fato de a maior parte dos trens de carga que circulam nos Estados Unidos ser movido por esse combustível. Somem-se a essas quantidades as contribuições que procedem da mineração de carvão (acionamento de máquinas: 80 mg/kg; e detonação de dinamite: 400 mg/kg). Além disso, o refino de petróleo para produção de CVP contribuiu com outros 130 mg/kg.

Os precursores mais ativos de POF são emissões para o ar de NO_x e de Compostos orgânicos voláteis que não metano (NMVOC), com participação, respectivamente de 67 % e 23 % do total de impactos para a categoria. As perdas de NMVOC (810 mg/kg aço) procedem do refino de petróleo para produção de CVP: 570 mg/kg. Além desses, observaram-se ainda contribuições significantes para os transportes de matérias-primas em geral, que juntos totalizam 100 mg/kg (composto em 64 % por transporte do tipo transoceânico; 27 % por transporte ferroviário; e 8,3 % por deslocamentos rodoviários).

A manufatura do aço gera um consumo específico de água 35,8 L/kg aço líquido, ou seja, 90% do total de impactos gerados pelo sistema como WD. O consumo específico de água é bastante variável entre as empresas que compõem o setor siderúrgico brasileiro. Esse desempenho está condicionado a diversos parâmetros, dentre os quais se incluem: rota tecnológica, unidades de produção existentes; e, estratégias de gerenciamento do recurso (CNI, 2013). No entanto, de acordo com estatísticas do Instituto Aço Brasil, este valor para o ano de 2011 foi, em média, de 48,4 L/kg para plantas integradas a coque (IABr, 2012), caso específico do processo objeto deste estudo. Deve-se argumentar ainda que 84 % desse total são provenientes de água salobra captada do oceano que serve apenas para fins de refrigeração de equipamentos por contato indireto. Ao descontar-se tal parcela para ambas as situações nota-se que o resultado acumulado em termos de WD obtido para a cadeia produtiva em análise (5,83 L/kg) é bastante coerente com a média das plantas nacionais (6,96 L/kg) em termos de consumo específico de água doce.

Em termos gerais, 75 % do uso de água no processo de produção de aço destina-se a operações de transferência de calor, 13 % são empregados no controle de poluição do ar, e restante será consumido para condicionamento de materiais (Johnson, 2003). Dentre as unidades de processo a Coqueria se destaca por deter elevado consumo, que ocorre por conta do apagamento do coque. Já nas unidades auxiliares as caldeiras que compõe os ciclo de cogeração de energia (térmica e elétrica) das plantas aparecem com maiores demandantes por conta de seus sistemas de controle de emissão (FRANÇA, 2012). Destaque-se, por fim que o índice médio de recirculação de água no segmento nacional de produção de aço é de 95,5 % (IABr, 2016a).

A Depleção de Metais (MD) correspondeu a 2,88 kg Fe_{eq}/kg aço líquido. Destes, 76 % derivam da extração de Mn e o restante, de lavra de minério de Fe – que neste caso contempla as lavras dos *sinter feeds*, minérios granulados e *pellet feed* para manufatura de pelota. Muito embora o consumo individual de minério de Fe (1,47 kg/kg aço) seja de fato mais elevado que de Mn (46,9 g/kg), a predominância de contribuição desse último se explica devido a combinação de dois fatores. O primeiro fator está ligado à composição do minério de ferro. Admitiu-se para efeito destas estimativas que o teor de Fe no minério fosse de 47 % valor típico para jazidas brasileiras. Assim sendo, o consumo deste recurso mineral pelo processo foi de 680 g Fe/ kg aço líquido. Já o teor de Mn no minério foi estabelecido em 61 % projetando, portanto, uma depleção de 28,7 g Mn/kg aço líquido.

O segundo fator capaz de explicar a supremacia do Mn está ligado ao modelo de AICV que foi selecionado para quantificação dos impactos associados ao sistema de produto em termos de MD. A abordagem proposta por Goedkoop *et al.* (2008) considera o Fe como sendo padrão da categoria, atribuindo-lhe, portanto, fator de impacto FI = 1,00. Já o Mn, cuja disponibilidade no planeta é inferior à de seu similar metálico recebe FI = 76,6 por conta deste e de outros aspectos. Assim sendo, ao expressar as participações de Fe e Mn para MD por meio do modelo proposto por Goedkoop *et al.* (2008) obtêm-se respectivamente 0,68 kg Fe_{eq}/kg aço líquido para Fe, e 2,20 kg Fe_{eq}/kg aço líquido para Mn.

Os principais precursores para HTc são as emissões de formaldeído (CH_2O) (0,13 mg Formaldeído/kg aço), 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina (TCDD) (3,26E-8 mg TCDD/kg aço) e o Benzeno (C_6H_6) (1,71 mg Benzeno/kg aço) para o ar. Destaca-se neste caso a geração de eletricidade via grid brasileiro que corresponde a 32 % do total do impacto da categoria, (1,30E-12 CTUh). A este total vinculam-se queimas de gás natural (5,4 %), bagaço de cana-de- açúcar (5,1 %) e de óleo pesado (21 %). As operações de transporte contribuíram, juntas, com outros 43 % do total para este impacto. O maior contribuinte é transporte ferroviário (9,27E-13 CTUh), ao que se seguem transporte transoceânico (7,38E-13 CTUh) e rodoviário (9,27E-14 CTUh). Para todos estes deslocamentos a principal fonte de contribuição remete ao uso de óleo combustível pesado para movimentação de máquinas e/ou produção de eletricidade neste caso, em países do continente europeu desde os quais se transporta Antracito. Reda *et al.* (2015) identificaram que cerca de 58 % das emissões de óleo pesado são compostas por formaldeído. Dioxinas são citadas por Yive e Tiroumalechetty (2008) como elemento constituinte das cinzas provenientes da queima de bagaço-de-cana. Já Cristale (2012) e Mugica-Alvarez *et al.* (2015) detectaram emissões de hidrocarbonetos cíclicos também na combustão de biomassa de cana. Para HT_{NC} destacam-se emissões aéreas de xileno e tolueno (1,03 e 0,91 mg /kg aço), e de acetaldeído (30 ng/kg aço). O perfil de impacto desta categoria é semelhante ao do HTc e assim, figuram como fontes de geração de aspectos ambientais para o caso presente também as combustões de óleo combustível pesado e bagaço de cana (produção de energia) que juntas contribuem com 15 % da participação para a categoria (2,39E-14 CTUh/kg aço). Somam-se a esses os transportes transoceânico, ferroviário e rodoviário, cujos aportes totalizam outros 30 %, 28 % e 7,4 % respectivamente. As emissões de xileno se devem em sua maioria a operações de transportes de matérias-primas que juntas são responsáveis por 84 % da emissão. Os transportes também cooperaram com 84 % do total de tolueno liberado para o ambiente. Já a emissão de acetaldeído se deve à

queima de combustíveis da matriz elétrica nacional, que foi responsável por 47 % do total de impactos da categoria.

A produção de energia elétrica via matriz brasileira contribui com 94 % do total de impacto para FEC. Neste caso a integralidade dos efeitos procede da produção agrícola de cana-de-açúcar, cujo bagaço representava 6,8 % da fonte de provimento de eletricidade do país em 2012. O cultivo de cana no Brasil predispõe o uso de pesticidas diversos. Por serem de ação superficial, esses ativos não ficam incorporados ao produto agrícola; portanto, as quantidades dos mesmos que são dosadas para o controle de pragas e doenças da cana acabam sendo dispostas no solo. Por conta disso, o sistema registrou perdas de ametrina (0,84 mg/kg aço), diuron (0,78 mg /kg) e clomazone (0,62 mg/kg) para esse meio. A lixiviação de defensivos agrícolas para o solo e o lençol freático é enfatizado por Monquero *et al*. (2008) como a principal fonte de toxidade para o ambiente associada ao cultivo de cana-de-açúcar.

Tal como ocorreu antes com o perfil energético, procedeu-se também uma avaliação apenas do perfil de impactos derivados de emissões geradas apenas pelas etapas inerentes ao processo. A Tabela 6 descreve os resultados encontrados a partir da condução dessa iniciativa. Dentro ainda do mesmo diapasão, apresentam indicados impactos inerentes ao processo em termos de CC, TA, POF, WD e MD (Figura 13), e de HTc, HT_{NC} e FEC (Figura 14).

Tabela 6 - Perfil de Impactos Ambientais da produção de 1,0 kg aço líquido para etapas inerentes ao processo

Método de AICV	Categoria de impacto	Unidade	Cargas Inerentes ao Processo
Recipe	CC	kg $CO_{2\ eq}$	1,33
	TA	kg $SO_{2\ eq}$	5,94E-04
	POF	kg NMVOC	4,92E-04
	WD	L	36,90
	MD	kg Fe_{eq}	6,37E-06
USEtox	HT_C	CTUh	1,36E-12
	HT_{NC}	CTUh	2,33E-14
	FEC	CTUe	7,40E-03

Figura 13 - Perfil de impacto ambiental derivados de emissões associadas a etapas inerentes a produção de 1 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial

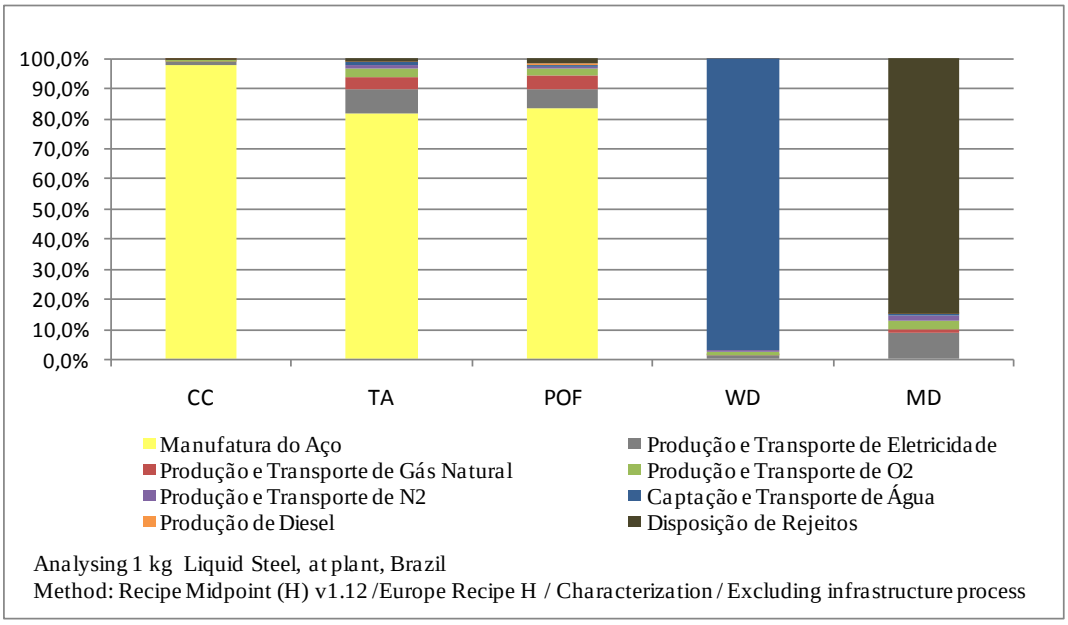
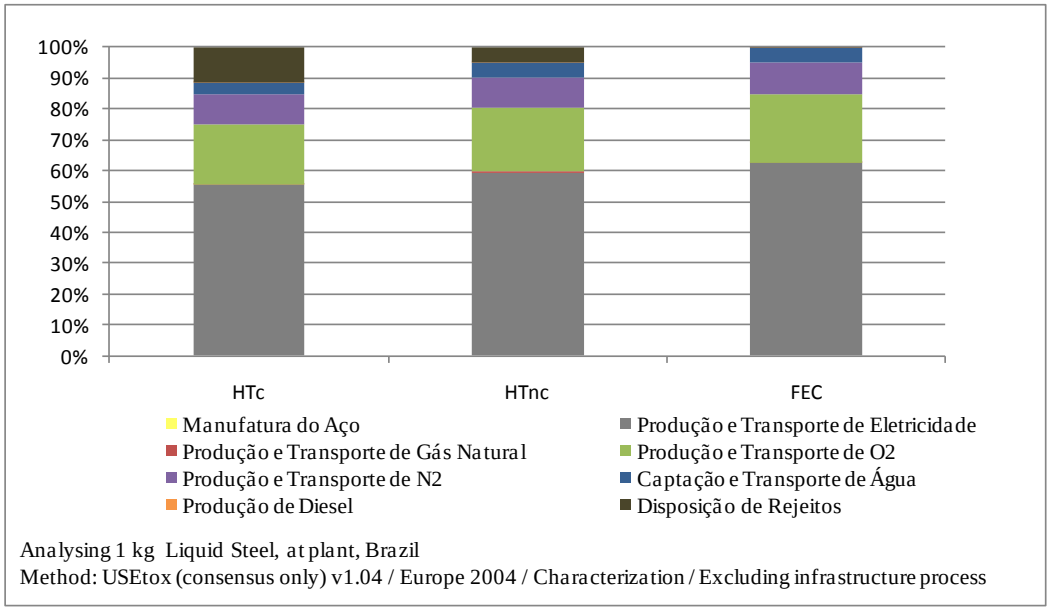


Figura 14 - Perfil de impacto ambiental em termos de Toxicidades decorrente de cargas inerentes à produção de 1 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial



Os principais responsáveis pelo impacto de CC são CO_2 e N_2O. A emissão de CO_2 corresponde por 95,8 % do total de emissão desta categoria, ao que se seguem 4,1 % de aportes de N_2O. As emissões de CH_4 são residuais, contribuindo com cerca de 0,10 % do total, ainda que derivem em sua maior parte de cargas inerentes ao processo.

A manufatura do aço líquido contribui diretamente no total com 97 % dos 1,33 $kgCO_{2eq}/kg$ aço; o restante se origina da geração de eletricidade (Figura 13). Quanto aos precursores em si

a manufatura do aço emite diretamente 1,25 kg CO_2 /kg aço líquido (94 % do montante de perdas dessa substância), o que é justificado pelo fato de a quase totalidade das transformações associadas a esse processamento fazer uso de energia térmica gerada da queima de gás natural e materiais carbonosos. Ainda que distante, a queima de combustíveis para geração de eletricidade emite 22,5 g CO_2/kg aço (1,8 % do total geral da categoria). A manufatura do aço também é responsável por quase 99 % das emissões de N_2O com 178 mg/kg. O composto se forma a partir da reação entre N_2 e O_2 (ambos introduzidos nos sistemas de queima via ar atmosférico) em temperaturas superiores a 1250 ºC.

Perdas de SO_x e NO_x são precursores majoritários de impactos como TA, contribuindo com 51 % e 36 % respectivamente do valor acumulado para a categoria. A manufatura do aço aparece mais uma vez como a maior contribuinte para ambas as emissões (Figura 13). Esta etapa contribui com 97 % dos lançamentos de SO_x e 88 % das liberações de NO_x. Essa participação se deve também a queima de combustíveis fósseis que ocorre nos Altos Fornos, na Coqueria, bem como, nas centrais geradoras de energia. Outra parcela de aporte de NO_x procede da queima de combustíveis para produção de eletricidade da matriz nacional. As emissões dessa substância originam-se neste caso de combustão de gás natural (3,7 %), carvão (2,9 %), óleo pesado (2,3 %) e bagaço de cana (1,3 %).

Os óxidos de NO_x também aparecem como principais precursores de POF, contribuindo com 77 % do total desta categoria. A ele se seguem emissões de NMVOC cujas perdas atingem 53,7 mg/kg aço líquido (11 % do total de impactos como POF). A manufatura do aço contribui com 56 % da emissão de NMVOC, enquanto a produção gás natural acrescenta 35% do montante.

No que se refere a WD, a manufatura do aço detém quase todo o consumo específico de água (35,8 L/kg aço líquido), com 97 % da participação desta categoria. No entanto, deve-se argumentar uma vez mais que 84 % desse total são provenientes de água salobra captada no oceano a qual serve apenas para fins de refrigeração de equipamentos por contato indireto.

Quando a avaliação se restringe a cargas inerentes ao processo, os impactos ficam bastante amortecidos, como inclusive e a priori, já se poderia supor. As parcelas de contribuição nesse caso passam a variar entre micro e nano-gramas de impacto (µg Fe eq e ng Fe eq). Por outro lado, destacam-se nesse contexto, perdas para o solo geradas em decorrência das ações de extração dos recursos minerais, as quais contribuem com 85 % do total do impacto desta

categoria. No entanto, para o caso presente, esses efeitos mostraram-se novamente bastante discretos para as minerações de Fe e Mn, assim como já fora indicado na Figura 10.

Os principais precursores para HT_C são emissões aéreas de formaldeído (CH_2O) (50 µg /kg aço), 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina (TCDD) (5,80 pg/kg) e Benzeno (C_6H_6) (60 µg/kg). Essas substâncias derivam da queima de combustíveis para a produção de energia elétrica do grid brasileiro o qual corresponde a 88 % do total do impacto desta categoria. Combustões de gás Natural (15 %), bagaço de cana-de- açúcar (14 %) e Óleo Pesado (58 %) são os principais responsáveis por este percentual. No que se refere às emissões individualizadas a combustão de óleo pesado contribui com 61 % dos lançamentos de formaldeído e a queima de bagaço, com 20 % do total de TCDD emitido e 61 % do montante pleno de benzeno. Para HT_{NC} as principais contribuições são, novamente, perdas para o ar de acetaldeído (10 µg /kg), tolueno ($C_6H_5CH_3$) (30 µg /kg) e Metano, tetracloro (CFC-10: 14 ng /kg). O perfil de impacto desta categoria segue de perto o perfil desenhado por HTc e assim, a queima de combustíveis no mix de produção de energia elétrica se destaca como principal contribuinte (95 %) da categoria. No que tange a emissões, 72 % ocorrem na forma de acetaldeído (via combustão de óleo pesado), 40 %, de tolueno, e 85 % de CFC-10 (nesse caso, via queima de bagaço-de-cana). A produção de energia elétrica contribuiu com a totalidade dos impactos de FEC. Responsável por 6,8 % do mix de produção de energia, a queima do bagaço de cana-de-açúcar se destaca na emissão para o solo de ametrina (770 µg/kg), diuron (720 µg/kg) e clomazone (570 µg/kg), que são provenientes do uso de defensivos agrícolas para controle de pragas naquele cultivo.

5.3.3. Análise de Sensibilidade da Multifuncionalidade

Como já foi reportado na seção 5.1.2, optou-se pelo uso do '*Surplus Method*' para tratamento de situações de multifuncionalidade que ocorressem no sistema em análise. Entretanto, como adiantado, também naquele trecho do estudo decidiu-se abordar as mesmas questões por meio de procedimento de Alocação com o intuito verificar, a título de Análise de Sensibilidade, quais seriam os efeitos decorrente da decisão metodológica sobre os resultados finais do estudo. Outros dois produtos podem ser considerados oriundos da produção de aço líquido: a escória de Altos Fornos, e a escória de Aciaria. Estes materiais tem características que os credenciam a ser matérias-primas de outros processos; assim, os mesmos serão tratados como coprodutos da produção do aço. Xie (2012) reporta que em virtude de propriedades relacionadas à textura e compactação, a escória de Aciaria constitui-se em agregado para

utilização em asfaltos. Já Joulazadeh (2010) faz referência a adição de escória de Altos Fornos à formulação de cimentos, com taxas variáveis entre 20 e 40 %.

O *Surplus Method* consiste em destinar a totalidade das cargas ambientais geradas a montante da situação de multifuncionalidade para o coproduto que permanecerá no sistema (SUH *et al.*, 2010), fazendo então com que a situação de multifuncionalidade deixe de ocorrer. Suh *et al*. alertam que a aplicação do *Surplus Method* não converte os produtos que atravessariam as fronteiras do sistema em estudo em direção a outros processamentos antrópicos em rejeitos. Tal ajuste seria metodologicamente inadequado pelo fato de, onerar indevidamente o produto em análise em termos dos impactos decorrentes de sua destinação no ambiente. No caso presente, o *Surplus Method* foi aplicado, naturalmente, ao aço líquido de forma a lhe atribuir a totalidade das cargas geradas no sistema antes da ocorrência da situação de multifuncionalidade.

O procedimento de Alocação têm por objetivo particionar cargas ambientais pregressas entre coprodutos gerados em um mesmo subsistema ou processo elementar (ABNT, 2009). Há duas classes de critérios de alocação: (i) baseada em requisitos físicos (massa, conteúdo energético, entalpia, grau de exergia, teor de certo constituinte, entre outros); e, (ii) baseada em critérios de ordem econômica (preço de mercado, custos, e afins). Para este estudo optou-se por realizar alocações pelos critérios mássico e econômico. Em virtude de aspectos de confidencialidade associados ao arranjo processual em análise, as parcelas individuais em termos de massa e valor econômico dos coprodutos foram relativizadas tomando por referência quantidades unitárias de aço líquido. O resultado desse processo de normalização encontram-se descritos na Tabela 7.

Tabela 7 – Contribuições unitárias de massa e preço para aço líquido, e escórias de Altos Fornos e Aciaria

Produto	Valores mássicos (kg)	Valores econômicos (R$)
Aço Líquido	1,000	1,0000
Escória de Altos Fornos	0,342	0,0350
Escória de Aciaria	0,152	0,0035

As contribuições percentuais utilizadas na condução desta etapa do estudo foram determinadas a partir da resolução do sistema de equações lineares de 1 a 6 que constam dos Apêndice A e B do presente estudo. Esses resultados são explicitados a seguir na Tabela 8.

Tabela 8 – Critérios empregados para alocação mássica e de valor econômico.

Produto	Critério Mássico de Alocação (kg)	Critério Econômico de Alocação (R$)
Aço Líquido	66,9	98,77
Escória de Alto Forno	22,9	1,18
Escória de Aciaria	10,2	0,05

Os impactos ambientais associados à produção de aço líquido foram recalculados considerando-se cada qual dos métodos de tratamento de multifuncionalidades. Os resultados obtidos dessa ação encontram-se registrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Efeito da aplicação de diferentes métodos para tratamento de multifuncionalidade aos perfis de impacto energético e derivado de emissões da produção de aço líquido.

Método	Categoria de impacto	Unidade	Cargas Totais			Cargas Inerentes ao processo		
			Surplus Analysis	Alocação Mássica	Alocação Econômica	Surplus Analysis	Alocação Mássica	Alocação Econômica
CED	NRF	MJ	25,63	17,15	25,30	1,27	8,50E-01	1,26
	NRN	MJ	4,97E-01	3,33E-01	4,91E-01	1,40E-01	0,94E-01	1,39E-01
	NRB	MJ	4,63E-07	3,10E-07	4,58E-07	2,10E-08	1,40E-08	2,10E-08
	RB	MJ	5,55E-02	3,71E-02	5,48E-02	3,99E-02	2,67E-02	3,94E-02
	RWSG	MJ	1,82E-02	1,22E-02	1,80E-02	1,11E-02	7,44E-03	1,10E-02
	RW	MJ	1,05	7,04E-01	1,04	9,29E-01	6,21E-01	9,18E-01
ReCiPe Midpoint (H)	CC	kg $CO_{2\ eq}$	1,56	1,04	1,54	1,33	8,90E-01	1,31
	TA	kg $SO_{2\ eq}$	3,39E-03	2,26E-03	3,34E-03	5,90E-04	4,00E-04	5,90E-04
	POF	kg NMVOC	3,47E-03	2,32E-03	3,43E-03	4,90E-04	3,30E-04	4,90E-04
	WD	L	39,9	26,7	39,4	36,9	24,7	36,5
	MD	kg Fe_{eq}	2,88	1,93	2,85	6,37E-06	4,26E-06	6,29E-06
USEtox	HT_C	CTUh	4,04E-12	2,71E-12	4,00E-12	1,36E-12	9,10E-13	1,34E-12
	HT_{NC}	CTUh	1,63E-13	1,09E-13	1,61E-13	2,30E-14	1,60E-14	2,30E-14
	FEC	CTUe	8,56E-03	5,73E-03	8,46E-03	7,40E-03	4,95E-03	7,30E-03

Nota-se que a alocação mássica teve maior efeito sobre os resultados das diversas categorias de impacto consideradas na análise, quando comparada às demais alternativas para tratamento de multifuncionalidades. Já a alocação econômica e o *Surplus Method* proporcionaram efeitos que podem ser considerados semelhantes.

O uso de alocação por massa reduziu de maneira significante o perfil de impactos do aço líquido pelo fato de, a partir dessa abordagem serem atribuídos 66,9 % das cargas ambientais totais geradas no sistema ao produto em questão (Tabela 8). A parcela atribuída ao aço nessa situação é bastante inferior àquelas que decorrem das aplicações do *Surplus Method* e da alocação por critério econômico. Inclusive, já seria de se esperar que houvessem desempenhos semelhantes nesses dois casos, dada a similaridade das parcelas imputadas ao aço, respectivamente de 100 % e 98,7 %. Os resultados obtidos pela alocação econômica se justificam principalmente devido a variabilidade de aplicações do aço, que se estende desde a confecção de bens de consumo até o aproveitamento na construção naval. As escórias de Altos Fornos e Aciaria são, de sua parte, produtos menos nobres – e por isso mesmo, com mercados não ainda estabelecidos – e que tem por principal finalidade a substituição de outros materiais.

Para desenvolvimento das seções subsequentes deste estudo, optou-se por seguir tratando casos de multifuncionalidade pelo *Surplus Method* e por alocação mássica. A alocação por critério econômica foi desconsiderada dada a similaridade dos resultados alcançados por seu intermédio com aqueles proporcionados pelo *Surplus Method*.

6. IDENTIFICAÇÃO DE FOCOS DE IMPACTOS

A aplicação da técnica de ACV utilizando o escopo do tipo “berço-ao-portão” para a produção do aço líquido proporcionou compor o diagnóstico inicial para esta manufatura. O detalhamento dos resultados (Seção 5.3) forneceu elementos que permitissem detectar as etapas do processo que geram impactos mais significantes para as categorias verificadas no estudo. A síntese dessa investigação encontra-se descrita na Tabela 10.

Uma análise que relacionou magnitude e frequência de impactos associados a produção do aço líquido destacou como principais responsáveis por esses efeitos adversos os seguintes processos e operações: extração de carvão mineral, queima de combustíveis para transportes (ferroviário, rodoviário e transoceânico) de matérias-primas, refino de petróleo para produção de CVP, e a matriz brasileira de geração de eletricidade.

A extração de carvão mostrou ter contribuições importantes em termos de NRF, CC, TA e POF. A magnitude desta etapa é significativa principalmente quanto à PED (ou seja, para NRF). Quanto a emissões, a extração de carvão é responsável por emissões de CH_4 (CC) e NO_x (TA e POF). Já a queima de combustíveis para fins de transportes de matérias-primas e insumos de processo se reflete em termos de NRB, RB, RWSG, CC, TA, POF, HT_c e HT_{NC}.

O refino de petróleo com vistas a obtenção de CVP é também recursivo e apresenta impactos nas mesmas categorias que a extração de carvões. Destaque-se porém nesse caso que os aportes em termos de CC se devem e sua maioria a emissões de CO_2, e que aqueles relativos a TA estão concentrados em perdas atmosféricas de NO_x e SO_x.

A geração termelétrica representa a principal fonte de impactos associada à matriz energética nacional. Muito embora a magnitude de suas contribuições para NRN, RB, RWSG, CC, HT_c, HT_{NC} e FEC seja mais discreta que aquela registrada pelas operações de transporte, este estágio de processo se difunde por todo o sistema de produto.

As extrações de minério de ferro e de manganês tem perfil oposto ao da geração de eletricidade, por representar impacto significativo, porém em apenas uma categoria de impacto: MD. Essa mesma tônica se manifesta no desempenho da produção em si de aço líquido, que contribui ativamente para os impactos em termos de CC e WD.

Tabela 10 - Hierarquização dos efeitos adversos da produção de aço líquido para cada categoria de impacto e aspecto ambientais avaliados

Categoria de Impacto	Aspectos Ambientais	Etapa de processo
NRF	Consumo de enegia não renovável fóssil	Extração e Transporte de Carvão Mineral; Refino de Petróleo para produção de CVP
NRN	Consumo de energia não renovável nuclear	Produção energia elétrica nuclear para abastecer transporte ferroviário; Queima de combustível do mix de produção de energia elétrica do Grid Brasileiro
NRB	Consumo de energia não renovável de biomassa	Queima de Combustível no Transporte Transoceânico (produção de palm oil)
RB	Consumo de energia renovável de biomassa	Queima de combustível: matriz energética nacional e para transporte ferroviário
RWSG	Consumo de energia renovável de efeitos naturais	Queima de combustível: matriz energética nacional e para transporte ferroviário
RW	Consumo de energia renovável da Água	Produção de Energia Elétrica do Grid Brasileiro
CC	Emissão de CO_2	Manufatura do Aço Líquido; Queima de Combustível nos transportes Transoceânico, Ferroviário e Rodoviário; Refino de Petróleo para produção de CVP; e Queima de combustível do mix de produção de energia elétrica do Grid Brasileiro
	Emissão de CH_4	Extração de Carvão Mineral e Antracito
TA	Emissão de SO_x	Queima de Combustível nos transportes Transoceânico, Ferroviário e Rodoviário; Refino de Petróleo para produção de CVP
	Emissão de NO_x	Queima de Combustível nos transportes Marítimo, Ferroviário e Rodoviário; Refino de Petróleo para produção de CVP; e Extração de Carvão Mineral
POF	Emissão de NO_x	Queima de Combustível nos transportes Marítimo, Ferroviário e Rodoviário; Refino de Petróleo para produção de CVP; e Extração de Carvão Mineral
	Emissão de NMVOC	Queima de Combustível nos transportes Transoceânico, Ferroviário e Rodoviário; e Refino de Petróleo para produção de CVP
WD	Captação, tratamento e distribuição de Água	Manufatura do Aço Líquido
MD	Depleção de Materiais Metálicos	Extração de minérios de Ferro e Manganês
HT_c	Emissão de Formaldeído	Queima de combustível: matriz energética nacional e para transporte ferroviário
	Emissão de Dioxina	Queima de Combustível no Transporte Transoceânico; Extração de carvão mineral nos EUA; Disposição de rejeitos da Manufatura do Aço Líquido; Queima de combustível do mix de produção de energia elétrica do Grid Brasileiro
	Emissão de Benzeno	Queima de combustível: matriz energética nacional e para transporte ferroviário
HT_{NC}	Emissão de Xileno	Queima de combustível: matriz energética nacional e para transporte ferroviário
	Emissão de Tolueno	Queima de combustível: matriz energética nacional e para transporte ferroviário
	Emissão de Acetaldeído	Queima de combustível: matriz energética nacional e para transporte ferroviário
FEC	Emissão de Ametrina	Queima de combustível: matriz energética nacional
	Emissão de Diuron	Queima de combustível: matriz energética nacional
	Emissão de Clomazone	Queima de combustível: matriz energética nacional

7. SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE MELHORIA

A identificação de etapas de processos de maior influência sobre o perfil de impactos do aço líquido abre a perspectiva para que sejam formuladas alternativas para melhoria de desempenho ambiental, com vistas à implantação naquele arranjo produtivo. Nesse processo, foram levados em consideração quatro critérios:

I. As soluções deveriam ser operacionalmente factíveis, ou seja, que as ações selecionadas precisariam já ter sido implementadas em processos de escala industrial e, ao menos em termos técnico-processuais mostrarem resultados satisfatórios;

II. As alternativas se mostrassem economicamente viáveis, o que predispõe, que tanto os desembolsos a elas associados sejam executáveis pela organização, como também que suas Taxas Internas de Retorno (TIR) fossem superiores às respectivas Taxas Mínimas de Atratividades (TMA);

III. As propostas de solução fossem capazes de atuar, na medida da possibilidade, de maneira simultânea sobre diferentes problemas ambientais; e

IV. As expectativas da organização que forneceu dados para condução do estudo, que entende que as propostas de alteração em sua lógica produtiva devem ser por ela concebidas ou ao menos, influenciadas. Além disso, a empresa sente-se mais confortável em atuar dentro de seu parque industrial até que as opções de melhoria potencial de consumos e emissões tenham sido esgotadas para depois atuar junto a fornecedores e terceiros.

A Tabela 11 foi estruturada com o intuito de estabelecer os limites da atuação relacionada ao critério IV. Nela, todos os impactos analisados pelo estudo foram distribuídos entre cargas inerentes ao processo de produção de aço, e cargas externas. Muito embora as cargas geradas no processo mostrem ser menores que aquelas que lhe são imputadas por ativos diversos, os interesses da organização foram respeitados para efeito de seleção de alternativas. Além disso, outros requisitos associados a cada foco de impacto ambiental, foi também considerados pelo mesmo processo. Cada qual dessas situações é discutida a seguir.

Os transportes de matérias-primas aportam impactos ambientais significativos ao sistema de produto em decorrência da produção e da queima de combustíveis. No entanto, o processo de

produção de aço predispõe o uso de matérias-primas específicas, que na grande maioria dos casos procedem de regiões determinadas, e que não são de fácil substituição. Tamanho grau de seletividade acabou, inclusive, por desqualificar ações de substituição desses materiais como potenciais soluções de melhoria.

Tabela 11 - Perfil de Impactos Ambientais da produção de 1,0 kg aço líquido de Cargas Externas vs Cargas Inerentes

Método de AICV	Categoria de impacto	Unidade	Cargas Inerentes ao Processo	Cargas Externas ao Processo	Total
CED	NRF	MJ	1,27	24,40	25,60
	NRN	MJ	1,40E-01	3,57E-01	4,97E-01
	NRB	MJ	2,09E-08	4,42E-07	4,63E-07
	RB	MJ	3,99E-02	1,56E-02	5,55E-02
	RWSG	MJ	1,11E-02	7,10E-03	1,82E-02
	RW	MJ	9,29E-01	1,24E-01	1,05
ReCiPe Midpoint	CC	kg $CO_{2\ eq}$	1,33	2,30E-01	1,56
	TA	kg $SO_{2\ eq}$	5,94E-04	2,80E-03	3,39E-03
	POF	kg NMVOC	4,92E-04	2,98E-03	3,47E-03
	WD	L	36,90	3,00	39,90
	MD	kg Fe_{eq}	6,37E-06	2,88	2,88
USEtox	HT_C	CTUh	1,36E-12	2,68E-12	4,04E-12
	HT_{NC}	CTUh	2,33E-14	1,40E-13	1,63E-13
	FEC	CTUe	7,40E-03	1,16E-03	8,56E-03

As justificativas para essa abdicação são proprietárias de cada ativo. A limitação para o minério de ferro é de cunho geográfico dado que no território nacional, este se concentra na quase totalidade no chamado Quadrilátero Ferrífero (região do estado de Minas Gerais em que o minério é abundante). Portanto, não haveria alternativa de fornecimento à condição que já praticada.

Segue nessa mesma linha o provisionamento de carvão mineral, que dada a ausência de reservas de qualidade no país precisa ser importado. Some-se a isso o fato do carvão ter que

atender a determinados requisitos de qualidade, a fim de conferir ao coque as propriedades que dele são esperadas. Assim sendo, a substituição de certo tipo carvão mineral por um sucedâneo de outra região, que se baseasse apenas no critério de distância do centro consumidor possivelmente não retratasse de forma adequada e fiel as necessidades técnicas do processo. Tais características acabaram por também descartar o suprimento para efeito de proposição de cenários de melhoramento.

Outra possibilidade seria buscar alternativas ao fornecimento de fundentes: calcário e dolomita. No entanto, o mercado é limitado em termos de qualidade desses ativos e, por conseguinte, tal possibilidade foi abandonada.

O refino de petróleo para produção de CVP é mais um estágio do processo que exerce forte influência sobre o perfil de impactos do aço. Porém, uma mudança desse material no mix de carbonosos que alimenta no processo deveria, como em outros casos, predispor o atendimento de requisitos de qualidade e dessa forma, qualquer cenário que alterasse o fornecimento do material foi excluído da análise.

Por outro lado, existem focos de impacto que se enquadram em todos os critérios de seleção de alternativas. São esses os casos específicos de geração de eletricidade, consumo de água; e do fornecimento de minério de manganês.

A produção de eletricidade via matriz energética nacional é outro foco de impactos do processo. Uma alteração na forma de suprimento dessa utilidade poderia trazer benefícios de amplitude sistêmica para a cadeia produtiva, sobretudo por poder influenciar simultaneamente diferentes efeitos ambientais. A questão seria abordada via implementação de alternativas que reduzissem a influência do grid nacional sobre o processamento do aço líquido.

O consumo de água – e a partir disso, as cargas ambientais geradas para deixá-la em condição de ser usada, sobretudo no processamento de aço em si – é outro foco de impacto passível de ser tratado por solução potencial de melhoria. Se por um lado, sua contribuição se concentra majoritariamente em WD, por outro, a redução da captação desse recurso é tema de interesse da organização parceira do estudo. Isso porque, assim como aparece assinalado na Tabela 11, a demanda de água inerente ao processo representa cerca de 93 % dos impactos registrados em termos de WD. Dessa forma, alterações de ordem técnica na manufatura do aço em si poderiam ser consideradas com vistas a equacionar esse problema.

A terceira das possibilidades consiste da substituição de fornecimento de minério de manganês. Mesmo não procedendo de cargas inerentes ao processo, esta proposta foi considerada por já ter sido implementada pela organização em virtude da viabilidade econômica, mas que não fora ainda analisada sob o viés ambiental.

Tendo em vista o arrazoado introduzido acima, as soluções propostas para dar seguimento do estudo compreenderam: (i) redução de consumo de eletricidade derivada do grid brasileiro no processamento do aço líquido; (ii) redução do consumo de água do mesmo processo; e (iii) alteração da procedência de fornecimento de minério de manganês.

A tradução das mesmas ações na forma de alternativas de melhoria aparece descrita a seguir de maneira bastante sintética. Ressalte-se que cada qual das medidas foi organizada sob a forma de um cenário de análise com vistas a facilitar a verificação dos efeitos energéticos e ambientais que delas decorreriam por confrontação simples com o desempenho original do processamento.

Cenário I – Estudo do reaproveitamento de Gás de Aciaria: na conjuntura atual do processo este gás é tido como rejeito, sendo sua queima integral "*flares*" a única ação de tratamento a que o mesmo é submetido previamente ao lançamento para a atmosfera. Seu reaproveitamento se apoia no Poder Calorífico que dispõe, propriedade que o credencia como fonte fornecimento de eletricidade na central termelétrica da planta. No entanto, a mesma ação predisporia que certas alterações de *layout* fossem implementadas no processo.

Cenário II – Implantação do "*Coke Dry Quenching*": o apagamento a seco do coque bruto é uma técnica consagrada em termos tecnológicos. Além de reduzir a captação de água para o processo – já que na condição atual esta operação ocorre a úmido – esta medida pode também atenuar a dependência de eletricidade do grid nacional, uma vez que o calor extraído do coque por contato direto com um gás inerte pode ser utilizado como aporte térmico em turbina de geração de energia elétrica.

Cenário III - Substituição do fornecedor de minério fino de manganês: essa alternativa verifica os desdobramentos energético e ambiental da incorporação da atual fonte de manganês aos processos de sinterização. A análise, que foi realizada *a posteriori* da implantação da medida, leva em conta minério de procedência e qualidade diferentes das de seu predecessor e teve a anuência da empresa para sua realização, muito embora aportasse cargas ambientais externas ao processo.

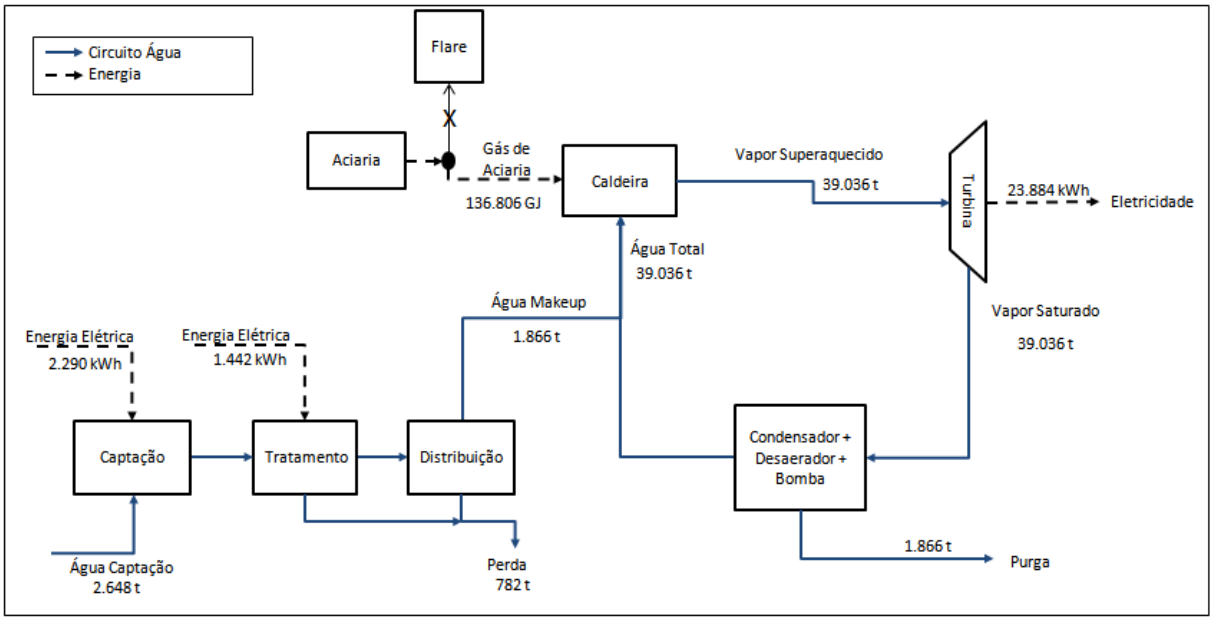
8. DIMENSIONAMENTO DAS SOLUÇÕES

Este capítulo tem por objetivo explicitar o desenvolvimento dos cenários propostos, mostrando como foram compostas as alternativas de análise, bem como as considerações e condicionantes usadas nesses dimensionamentos.

8.1. Cenário I: Reaproveitamento de Gás de Aciaria para Produção de Eletricidade

Na condição original de operação do sistema o gás proveniente da Aciaria é queimado na íntegra em sistema de *'flares'* sendo os produtos de combustão lançados na atmosfera. Visto que cerca de 84 % do consumo energético da planta é suprido pelo grid nacional, o uso desse gás na central termelétrica existente na usina para geração de energia mostra-se uma alternativa viável para reduzir tal dependência. No cenário de melhoria proposto optou-se pela adição de uma caldeira e um turbo gerador em linha exclusivos para a combustão do Gás de Aciaria. A configuração do arranjo está descrita na Figura 15. As estimativas das correntes foram efetuadas a partir de dados expressos em bases mensais para a geração de gás de Aciaria.

Figura 15 - Configuração e fluxos para o reaproveito proposto de Gás de Aciaria.



Nesta nova configuração o gás é introduzido em uma caldeira que gera vapor em condição de superaquecimento, que de sua parte, alimenta o turbo gerador para produção de energia elétrica. A fim de aproveitar ao máximo a energia contida no vapor, sua expansão no turbo gerador ocorre até que haja ligeira formação de líquido saturado no equipamento.

O fluído, então em equilíbrio líquido-vapor, será condensado e desaerado, retornando depois para a caldeira. As perdas/purgas deste sistema fechado são repostas por água captada junto a corpos de água, não sem antes sofrerem tratamentos específicos para adequação de parâmetros de qualidade. Caldeira e turbo gerador foram especificados de maneira a atingir níveis máximos de aproveitamento energético. Admitiu-se que a caldeira operaria com eficiência ε_c = 95 %, e o turbo gerador atingiria ε_t = 82 %. Partindo de uma entrada mensal de gás de Aciaria na caldeira de 136.806 GJ, estimou-se ser possível gerar 39.036 t vapor superaquecido a 42 bar e 440ºC. As funções de estado da água que circula pelo sistema nas formas de líquido subresfriado, vapor superquecido, bem como, vapor e líquido saturados estão indicadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Características de entrada e saída de matérias-primas do sistema.

Característica	Pressão (bar)	Temperatura (ºC)	Entapia (kJ/kg)	Entalpia Total (GJ)
Água Líquida (Caldeira)	1,0	25ºC	-	-
Vapor Superaquecido	42,0	440ºC	3.329	129.965
Vapor Saturado	1,0	99ºC	2.676	-
Líquido Saturado	1,0	99°C	418	-
Vapor Sat + Líquido Sat	1,0	99°C	643	25.110

A entalpia específica do equilíbrio líquido-vapor (h_{lv}) é função do título (x = 90 %) que a solução apresenta à saída do turbo gerador. O valor de h_{lv} = 643 kJ/kg foi estimado pela equação (1).

$$H_{vapor\ saturado} = H_{Líquido}^{1\ bar,99°C} + \%Líquido\left(H_{Vapor\ Saturado}^{1\ bar,99°C} - H_{Líquido\ Saturado}^{1\ bar,99°\ C}\right) \qquad (1)$$

Dessa forma, o vapor superaquecido possui uma entapia total H^{sat} = 129.965 GJ, enquanto a água em equilíbrio líquido-vapor que deixa o sistema leva consigo 25.110 GJ. A diferença de energia ($H^{sat} - H_{lv}$) = 85.981 GJ é quase que integralmente convertida em energia elétrica (a diferença corresponde a perdas pelo fato de o sistema não ser adiabático). Essa condição projeta uma produção adicional de eletricidade de EE_A = 23.884 MWh para o sistema.

Para efeito de estimativa do perfil de emissões desse sistema admitiu-se quatro hipóteses:

1. O processo de combustão da nova caldeira não altera a taxa de CO_2 do gás de combustão das caldeiras em operação;

2. Admitiu-se que o carbono presente no gás de aciaria sob a forma de CO será oxidado a CO_2 nas caldeiras tendo em vista as características e condições de operação do sistema;

3. Não há emissão de SOx e NOx em decorrência da queima de gás de aciaria em virtude da ausência de fonte de S e N na composição deste combustível (CO = 70 %; CO_2 = 20%, e H_2 = 10 %).

4. Como a temperatura de operação na fornalha T > 1.250ºC, admite-se que 0,25 $\%_{v/v}$ do N_2 alimentado na caldeira via ar atmosférico se converte em N_2O.

A Tabela 13 descreve emissões atmosféricas do cenário original e do Cenário I.

Tabela 13 - Comparação das emissões de CO e CO_2 entre disgnóstico base e cenário proposto para a análise das emissões das caldeiras.

Característica	Diagnóstico Base	Cenário Proposto
CO_2 (t)	28.897	28.905
CO (t)	5,23	-
N_2O (t)	50,10	50,50

As modificações empreendidas pelo Cenário I alteram dados do inventário de cargas ambientais do processo. Essa particularidade será melhor explorada mais adiante neste estudo.

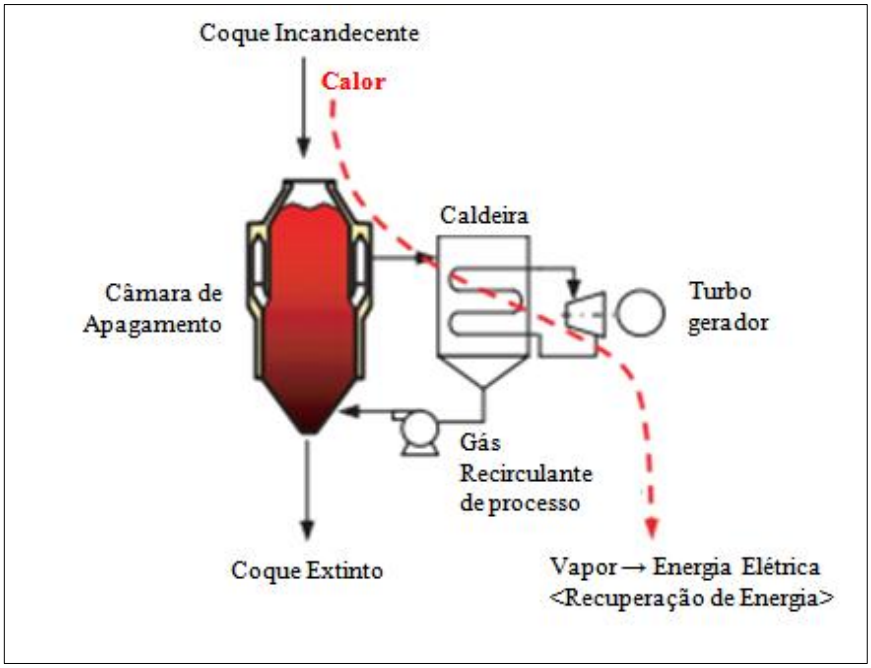
8.2. Cenário II: Implantação do "Coke Dry Quenching"

O coque produzido nas Coquerias deixa o processo com aparência incandescente e a cerca de 1250 °C. Para que seja manuseado nos Altos Fornos – equipamento que utiliza o coque como combustível sólido – sua temperatura deve ser reduzida; ou seja, o coque deve ser 'apagado'. Na condição original de operação do sistema o apagamento é realizado a úmido. No entanto, em muitas plantas, sobretudo do Oriente, esta operação já ocorre a seco. Na China, o processo a seco já está consolidado. Segundo Lui e Yuan (2016), o apagamento a seco é

ambientalmente mais adequado que seu homólogo por reduzir emissões de poluentes e recuperar a energia do coque na forma de energia elétrica.

O processo ocorre em uma câmara na qual o coque é alimentado em contracorrente com um gás inerte usado para resfriá-lo. O coque deixa este sistema a cerca de 180 °C. O gás – que deixa a câmara pela parte superior – carrega toda a energia sensível excedente do apagamento a seco do coque. Esse gás segue então para uma caldeira a fim de gerar vapor que alimentará um turbo gerador. Após ceder calor para a água o gás deixa a caldeira e retorna a câmara de apagamento permanescendo assim em circuito fechado. Um esquema simplificado dessa unidade encontra-se descrito na Figura 16.

Figura 16 - Figura esquemática do apagamento a seco do coque



Fonte: Adaptado de JASE-World.

A Figura 16 descreve em mais detalhes o balanço de massa e energia do sistema de apagamento do coque para as condições de operação da planta. O dimensionamento está baseado no estudo de Errera e Milanez (2000). Para a determinação das correntes de processo foram criados três Volumes de Controle (VC); são eles: VC_1) Câmara de Apagamento, VC_2) Caldeira e VC_3) Sistema Câmara de Aparamento + Caldeira. Os cálculos foram efetuados para uma alimentação de 1,0 t de coque.

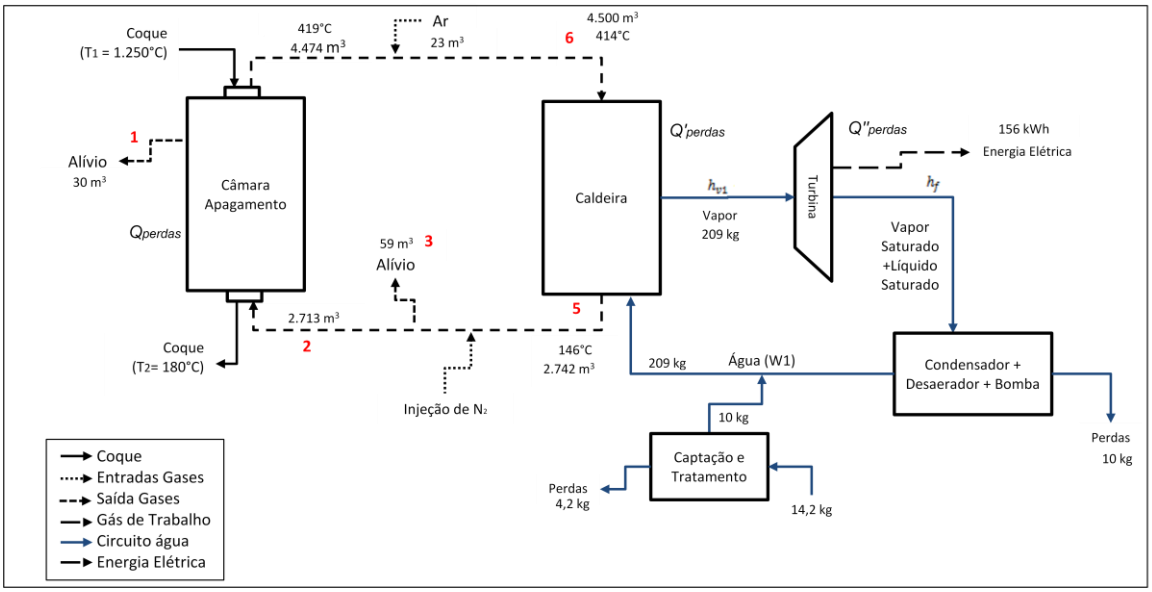
O primeiro passo consistiu em ajustar as condições de pressão e temperatura das correntes para os limites de operação esperados para o sistema. Este cálculo ocorreu de forma

individualizada para os elementos componentes de corrente de gás que deixa a câmara, a partir da aplicação da Equação (2). Tal como está expressa, a Equação 2 representa um exemplo de ajuste de P e T para a contribuição de CO ao gás emanado da câmara e foi aplicada nos mesmos moldes para os demais elementos constituintes do gás. Admitiu-se ainda que haveria aporte de pressão (△P) apenas para vencer as perdas de cargas inerentes ao escoamento do gás inerte (ou, gás de trabalho). Outra suposição foi de que a unidade operasse a pressão atmosférica.

$$\frac{1\ atm\ (P\ considerada\ da\ câmara).V_1^{CO}}{273} = \frac{1\ atm\ (P\ considerada\ da\ câmara).V_1'^{CO}}{(1250\ (T\ da\ câmara) + 273)} \qquad (2)$$

Nesse arranjo a água circula por um sistema fechado com características bastante semelhantes às do Cenário I. Por conta disso, também aqui as perdas serão supridas por água tratada, que procede de corpos receptores da circunvizinhança da planta, tal como está indicado no esquema da Figura 17.

Figura 17 - Esquema utilizado para dimensionamento dos fluxos de processo para 1,0 t de coque.



As ações de especificação e dimensionamento dessa lógica predispuseram que fossem adotadas as seguintes premissas:

1. O coque é alimentado a câmara de apagamento a 1250°C e dela emana a 180°C;

2. Admitiu-se que o gás usado para apagamento do coque tivesse comportamento ideal;

3. Considerou-se também que água (ou fluido de trabalho) emanada da turbina encontra-se em equilíbrio líquido-vapor a 1,0 bar e 99°C com título x = 90 %;

4. Estabeleceu-se que para este dimensionamento as eficiências de conversão de energia da caldeira e da turbina fossem, respectivamente, de ε_c = 95 % e ε_t = 82 %;

As correntes n° 1 e n° 3 do esquema que consta da Figura 16 correspondem respectivamente a queima/alívio de gás na câmara de apagamento, e queima/alívio de gás na linha de ligação entre a caldeira e esse mesmo equipamento. Estes alívios têm por finalidade o controle da pressão interna da câmara criada pela combustão dos gases, assim como ajustar a necessidade do balanço energético do sistema. A composição química e vazão destes gases foram consideradas semelhantes às do modelo estabelecido por Errera e Milanez (2000) e encontram-se indicadas na Tabela 14. A adição de ar à corrente de gás que deixa o câmara de combustão tem por finalidade auxiliar a combustão dos gases na caldeira. Já a entrada de nitrogênio puro irá diluir a composição do gás circulante.

Tabela 14 - Composição química relativa aos gases de alívio da Câmara de Apagamento do coque.

Contribuição por elemento / **Corrente**	**CO**	**H_2**	**CO_2**	**O_2**	**N_2**	**$H_2O_{(v)}$**
n. 1	20,38	5,25	3,60	0,96	68,5	1,31
n. 3	14,65	3,98	7,55	0,36	71,9	1,56

Fonte: Errera e Milanez (2000).

A composição do ar foi considerada como 79 % N_2 e 21 % O_2. Para a corrente de nitrogênio considerou-se 100 % N_2. As composições das correntes n° 5 e n° 6 foram determinadas por meio de balanços de massa.

Para avaliar a temperatura que o gás de trabalho atinge após percorrer o coque incandescente, foi necessário calcular a capacidade calorífica do coque e, a partir desse parâmetro, determinar sua entalpia na temperatura de operação do sistema. Para isto, utiliza-se a equação (3), que também foi extraída de Errera e Milanez (2000) levando em consideração a temperatura de entrada do coque na câmara. A partir deste cálculo, a capacidade calorífica foi considerada constante. Sendo o coque um material incompressível, a aproximação c(T) = dh/dT é válida quando da utilização da equação (4).

$$c(T) = 0{,}699.10^{-3}\left(\frac{kJ}{kg\,K^2}\right).T + 0{,}588\left(\frac{kJ}{kgK}\right) \qquad (3)$$

$$h\ (T) = c_{coque}\ (T_2 - T_1) \quad (4)$$

Os valores encontrados para as equações 3 e 4 estão listados na Tabela 15 abaixo.

Tabela 15 - Capacidade calorífica e entalpia específica calculados para o coque.

Parâmetros	Unidade	Valor
c_{coque}	(kJ/kg.K)	1,65
h (T)	(kJ/t)	1.768.257

Estima-se que cerca de 1,0 % do calor é perdido na câmara, bem como, outros 1,7 % deste total sejam liberados juntamente com os finos que deixam a câmara. Há também entrada de ar à temperatura ambiente no sistema. A energia resultante após estes eventos é responsável por aquecer o gás de trabalho, que segue para a caldeira a uma temperatura de 414 °C, e dela emana em direção à câmara a 146 °C. Os cálculos desta temperatura intermediária, após entrada do ar à temperatura ambiente, foram efetuados a partir da composição, capacidades caloríficas de cada elemento constituinte deste gás e temperatura imediatamente antes da mistura das correntes. Os dados empregados nessa análise estão descritos no Apêndice C.

A caldeira apresenta perdas estimadas de calor na ordem de 0,26 %, e um rendimento energético ε_c = 95 %. A água de reposição entra no circuito a 1,0 kg/cm^2 e 25°C (h_l = 105 kJ/ kg); já o vapor é gerado na forma superaquecida a 42 kg/cm^2 e 440°C (h_v = 3.329 kJ/ kg). Supondo que as condições de operação do sistema de cogeração sejam semelhantes às do sistema constituído para o Cenário I, estima-se para o caso presente uma produção de eletricidade de 156 kWh/t_{coque}, totalizando 19.415 MWh por mês.

8.3. Cenário III: Subtituição Minério Fino de Manganês

O consumo de minério fino de manganês ocorre na etapa de produção de sinter, na Sinterização. Este consiste, em verdade, de um minério ferroso com elevado teor de manganês. A taxa de de MnO do sinter é determinada pelo teor de Mn do gusa, que por sua vez obedece às premissas estabelecidas pela Aciaria quanto ao teor de Mn no aço. Naquele processo, o Mn contido no gusa líquido influenciará a fluidez e a viscosidade da escória formada no Convertedor.

Além disso, como cerca de 90 % do Manganês adicionado ao processo fica incorpora ao aço, seu consumo também irá influenciar a adição de elementos que, na Aciaria, constituam liga com o manganês. Praticamente todos os tipos de aço que sejam fabricados em escala econômica atualmente possuem manganês, seja como elemento de liga ou como matéria residual (BARÃO *et al.*, 2007).

Na condição original de operação do processo, o suprimento de minério de manganês é efetuado por três fornecedores, sendo a participação de cada um deles descrita a seguir na Tabela 16. Por motivos de confidencialidade, as razões sociais desses provedores foram mantidas em sigilo, ao ser apresentados sob códigos genéricos.

Tabela 16 - Participação percentual dos fornecedores de minério fino de manganês para efeito de consumo na Sinterização

Fornecedor	**Porcentagem de participação (%)**
Minério de Manganês A	15,90
Minério de Manganês B	89,30
Minério de Manganês C	1,80

Observa-se que mais de 98 % da necessidade de todo o manganês consumido na Sinterização é atendida pelos fornecedores A e B. Ambos os minérios procedem de processamentos que ocorrem na região Sudeste, e são bastante semelhantes em termos de qualidade química. Seus abastecimentos à usina ocorrem por intermédio de uma conjugação entre os modais rodoviário e ferroviário, por distância que totalizam 860 km. A situação a ser pleiteada pelo Cenário III consiste em alimentar o processo apenas com minério de Manganês C.

O fornecedor C é oriundo da região Norte do país e abastece o complexo siderúrgico via modal marítimo (3940 km entre o fornecedor e a usina). Apesar da distância de deslocamento entre origem e destino, o material C possui melhor qualidade. Ou seja: (i) cerca de três vezes menos sílica (SiO_2); (ii) aproximadamente de 4,5 vezes mais manganês (MnO); além de, (iii) perto de 3,8 vezes menos ferro (Fe) do que os minérios distribuídos pelos fornecedores A e B.

Observe-se que a taxa mais elevada de MnO no minério C predispõe menor consumo dessa matéria-prima. Por outro lado, teores reduzidos de SiO_2 se traduzem em menor geração de escória. Além disso, uma redução na entrada de SiO_2 para produção de uma mesma carga de

sinter resulta em menor consumo de calcário no sistema, usado nesse caso para manter a basicidade do produto Sinter. Por fim, caso a demanda de manganês viesse a ser suprida apenas pelo minério C, seria necessário efetuar um aporte complementar de minério de Fe para que a qualidade esperada para o produto final fosse preservada. Também haveria maior consumo de dolomita para acerto do teor de MgO do minério de ferro adicional. No mérito logístico, muito embora o centro distribuidor do minério de manganês C seja mais distante que os demais, a substituição plena dos materiais A e B pelo material C resulta em equilíbrio entre a distância percorrida e a quantidade de carga transportada. A Tabela 17 confronta os consumos específicos de materiais para obtenção de 1,0 t sinter que são requerido pela condição original de processo com aqueles demandados pelo Cenário III.

Tabela 17 - Consumo específico dos materiais para produção de 1,0 t sinter com a utilização de 100 % de minério de manganês C.

Material	Condição original de processo (kg/t)	Cenário III (kg/t)	Δ Consumo (%)
Minério de Manganês A	7,90	0	(–) 100
Minério de Manganês B	41	0	(–) 100
Minério de Manganês C	0,90	11	1088
Minério de ferro F	866	912	5,4
Calcário	201	183	(–) 8,8
Dolomita	51	53	4,0

Além disso, para as condições previstas no Cenário III o uso do minério C irá produzir sinter com cerca de 7,1 % menos de SiO_2 do que ocorre no cenário original, além de um teor de ferro total mais elevado que na condição de referência. Esta condição proporciona ainda a diminuição do consumo de coque nos Altos Fornos e dessa forma, um menor consumo de carvões para sua produção (5,0 g carvão /kg aço líquido produzido), exatamente, pelo fato de haver menor quantidade de impureza a ser retirada do processo.

9. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DAS SOLUÇÕES

Este capítulo descreve em mais detalhes a forma como se conduziu a verificação da efetividade das soluções propostas para melhoria de desempenho ambiental do processo de produção de aço líquido. As especificidades desta avaliação impediram que os resultados obtidos pudessem ser comparados com dados recolhidos junto á literatura, muito embora uma ampla pesquisa tenha sido conduzida com este intuito.

9.1 Cenário I - Reaproveitamento do Gás de Aciaria para geração de Energia Elétrica

9.1.1 Definição de Objetivo e Escopo

A aplicação da ACV para esta situação baseou-se nas orientações da norma ABNT NBR ISO 14044 (ABNT 2009), ocorreu sob enfoque atribucional, e com escopo do “berço-ao-portão”.

9.1.1.1 Definição de Objetivo

O objetivo desta análise é verificar se a ação de reaproveitamento do gás de aciaria para geração eletricidade em substituição ao consumo de energia da matriz brasileira se reverte em efetivo, na melhoria de desempenho ambiental da produção de aço líquido.

9.1.1.2 Definição de Escopo

As premissas adotadas no escopo do cenário proposto foram listadas como a seguir.

a) *Fluxo de Referência (FR):* tal como na condição original estabeleceu-se como valor para FR ‘produzir 1,0 kg de aço líquido’.

b) *Tipo e Qualidade dos dados:* foram utilizados dados primários para expressar consumos e emissões de matéria e energia do processo de produção de aço. As características e condicionantes desse processo estão descritas na seção 5.1. A modelagem do processo de geração excedente de energia elétrica ocorreu, a partir de dados secundários.

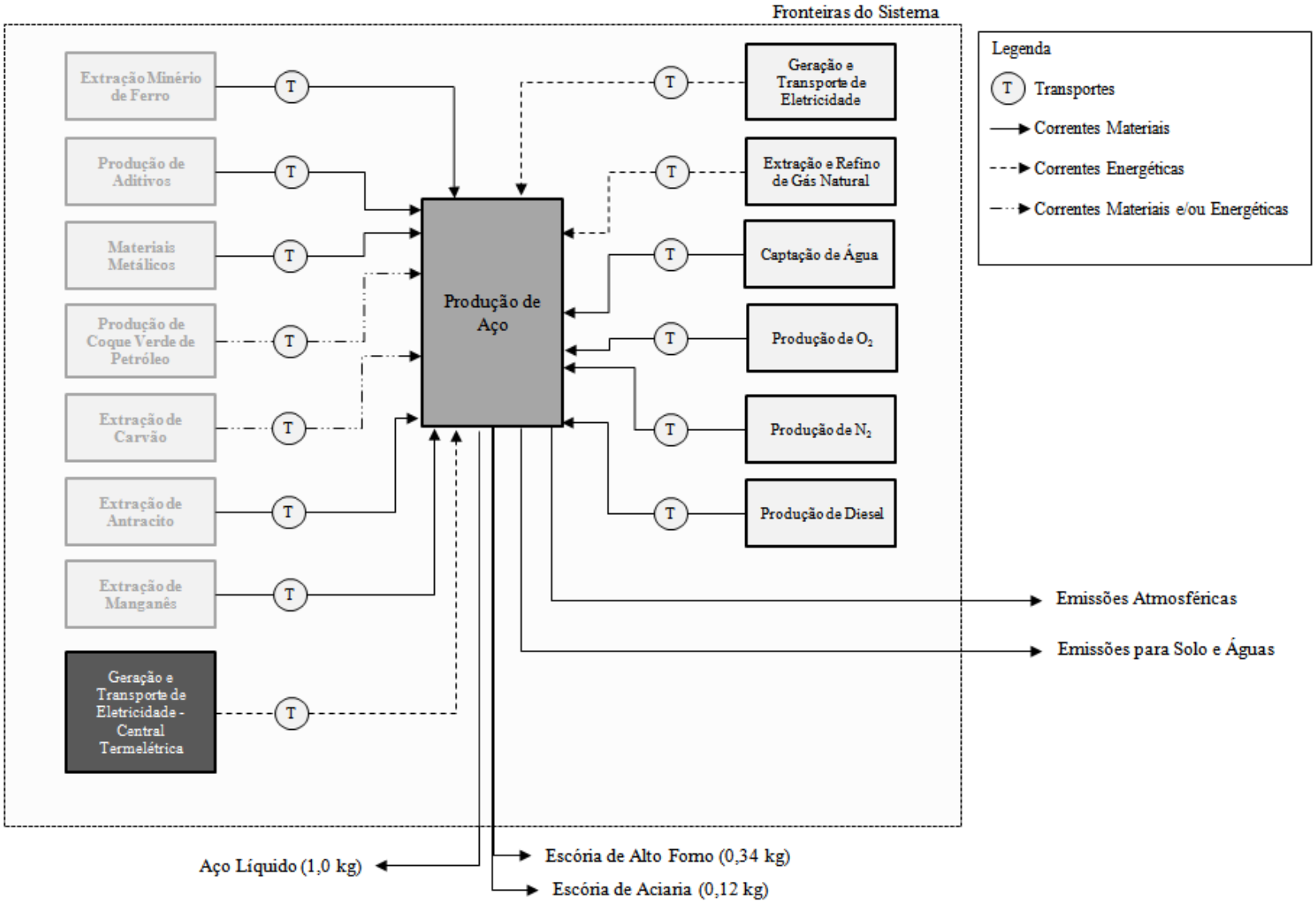
   No que se refere à *Qualidade dos dados*, a Cobertura Temporal e Geográfica usadas na formulação diagnóstico inicial foram mantidas neste caso. Já à Cobertura Tecnológica descrita para aquela situação acresceu-se o conteúdo apresentado na seção 8.1. Nesses termos o sistema de produto que considera a implementação do Cenário I está indicado a seguir na Figura 18.

c) *Critérios de Exclusão*: por uma questão de coerência, foram mantidas abordagens idênticas àquelas praticadas para elaboração do diagnóstico original.

d) *Tratamento da Multifuncionalidade*: fez-se uso mais uma vez de alocação energética para o tratamento da situação de multifuncionalidade associada ao refino de petróleo com vistas à obtenção de diesel e CVP. O caso da geração dos coprodutos Aço Líquido, e Escórias de Altos Fornos e de Aciaria, foi observado tanto pelo *Surplus Method* (SUH *et al.*, 2010; HEIJUNGS E SUH, 2002), como por alocação mássica.

e) *Métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) e Categorias de Impacto*: A fim de poder confrontar resultados, os mesmos métodos e categorias de impacto selecionados para efeito de formulação do diagnóstico da condição original de processo foram usados para o estudo do Cenário I.

Figura 18 - Sistema de Produto e respectivas fronteiras – Cenário I



9.1.2 Inventário de Ciclo de Vida – Cenário I

A Tabela 18 apresenta os dados de consumos e emissões contidos no ICV para o Cenário I.

Tabela 18 - Inventário simplificado da produção de 1,0 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial vs. Cenário I.

Produto		
Aço líquido (kg)	1,00	1,00
	Diagnóstico Inicial	Cenário I
Entradas Materiais		
Minério de Ferro (kg)	1,47	1,47
Carvão mineral e CVP (kg)	6,80E-01	6,80E-01
Antracito (kg)	4,90E-02	4,90E-02
Minério de Manganês (Mn) (kg)	4,70E-02	4,70E-02
Materiais e aparas metálicas (kg)	1,10E-02	1,10E-02
Aditivos de processo (kg)	3,50E-01	3,50E-01
Oxigênio líquido ($O_{2(l)}$) (kg)	4,40E-02	4,40E-02
Nitrogênio líquido ($N_{2(l)}$) (kg)	3,90E-02	3,90E-02
Água de processo (L)	35,83	35,84
Óleo Diesel (L)	6,00E-04	6,00E-04
Instalações e equipamentos (P)	1,33E-11	1,33E-11
Entradas Energéticas		
Gás Natural (MJ)	7,70E-01	7,70E-01
Eletricidade (kWh)	1,90E-01	1,10E-01
Saídas		
Emissões para o Ar		
Dióxido de carbono (CO_2) (fóssil) (kg)	1,25	1,25
Monóxido de carbono (CO) (fóssil) (kg)	6,00E-04	5,80E-04
Energia residual (calor) (MJ)	9,69E-01	4,81E-01
Óxidos de Nitrogênio (expresso como NOx) (kg)	3,30E-04	3,30E-04
Óxidos de Enxofre (expresso como SOx) (kg)	3,00E-04	3,00E-04
Compostos Orgânicos Voláteis (kg)	3,00E-05	3,00E-05
Material particulado, $\varphi < 2.5$ µm (kg)	2,20E-04	2,20E-04
Óxido Nitroso (kg)	1,79E-04	1,80E-04
Rejeitos para tratamento		
Restos metálicos de processo - aterro sanitário (kg)	1,18E-02	1,18E-02

9.1.3 Resultados e Discussão – Cenário I

A Tabela 19 compara os resultados dos impactos ambientais das cargas totais proporcionados pela modificação de processo introduzida no Cenário I com aqueles gerados pela condição original de processo, que doravante serão referidos como 'Impactos: Diagnóstico Inicial'.

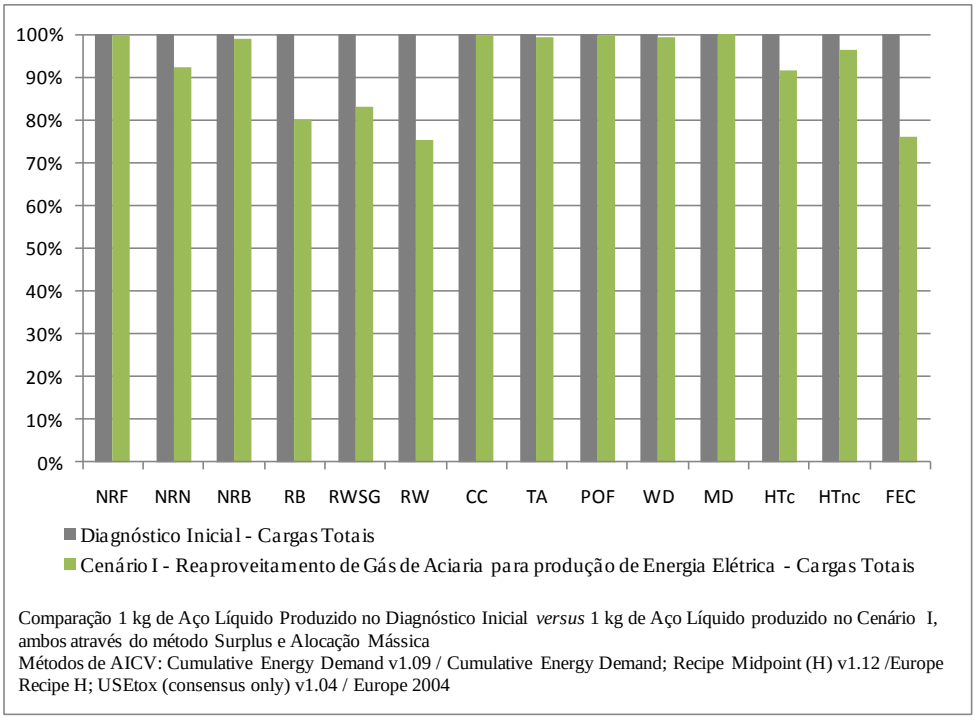
Em linhas gerais o Cenário I proporcionou melhora de desempenho ambiental da produção de aço líquido. Quando as modificações por ele introduzidas não foram benéficas, resultando em ganhos ambientais, o desempenho manteve-se no mesmo patamar que aquele alcançado pelo diagnóstico inicial. No entanto, deve-se destacar que os ganhos proporcionados pelo Cenário I foram bastante discretos, assim como pode ser observado tanto na Tabela 19 como Figura 19. Note-se que apenas os consumos energéticos que afetam as categorias de impacto de NRN, RB, RWSG e RW, bem como os efeitos em termos de toxicidade humana e ecotoxicidade aquática – descritos na forma de HT_C, HT_{NC} e FEC – apresentam redução em relação ao diagnóstico inicial de cargas totais.

Os decréscimos mais expressivos se deram em termos de RW e de FEC, sendo ambos da ordem de 24 %. Nesta última categoria de impacto, porém, deve-se atentar para a magnitude dos resultados obtidos, que pode influenciar de maneira significante qualquer variação relativizada de resultados.

Tabela 19 – Comparação entre Perfis de Impactos Ambientais da produção de 1,0 kg aço líquido para todas as categorias de impacto avaliadas – cargas totais do processo

Método de AICV	Categoria de impacto	Unidade	Impactos: Diagnóstico Inicial		Impactos: Cenário I	
			Surplus Method	Alocação Mássica	Surplus Method	Alocação Mássica
CED	NRF	MJ	25,63	17,15	25,53	17,08
	NRN	MJ	4,97E-01	3,33E-01	4,59E-01	3,07E-01
	NRB	MJ	4,63E-07	3,10E-07	4,58E-07	3,07E-07
	RB	MJ	5,55E-02	3,71E-02	4,44E-02	2,97E-02
	RWSG	MJ	1,82E-02	1,22E-02	1,51E-02	1,01E-02
	RW	MJ	1,05	7,04E-01	7,94E-01	5,31E-01
	TOTAL	MJ	27,26	18,23	26,84	17,96
ReCiPe	CC	kg $CO_{2\ eq}$	1,56	1,04	1,55	1,04
	TA	kg $SO_{2\ eq}$	3,39E-03	2,27E-03	3,37E-03	2,25E-03
	POF	kg NMVOC	3,47E-03	2,32E-03	3,46E-03	2,31E-03
	WD	L	39,90	26,70	39,70	26,60
	MD	kg Fe_{eq}	2,88	1,93	2,88	1,93E
USEtox	HT_C	CTUh	4,04E-12	2,71E-12	3,71E-12	2,48E-12
	HT_{NC}	CTUh	1,63E-13	1,09E-13	1,57E-13	1,05E-13
	FEC	CTUe	8,56E-03	5,73E-03	6,50E-03	4,35E-03

Figura 19 - Comparação de perfis ambientais da produção de Aço Líquido Cenário I vs Cenário Base – Cargas totais



Comparação 1 kg de Aço Líquido Produzido no Diagnóstico Inicial *versus* 1 kg de Aço Líquido produzido no Cenário I, ambos através do método Surplus e Alocação Mássica
Métodos de AICV: Cumulative Energy Demand v1.09 / Cumulative Energy Demand; Recipe Midpoint (H) v1.12 /Europe Recipe H; USEtox (consensus only) v1.04 / Europe 2004

A fim de verificar e abordar a questão por outro ângulo, uma análise alternativa foi efetuada considerando - para o Cenário I - apenas as etapas inerentes ao processamento de aço líquido. Os totais obtidos foram também comparados aos do diagnóstico inicial para as mesmas condições. Nesse caso fez-se uso mais uma vez dos métodos e categorias de impacto empregados nos casos anteriores. Os resultados gerados desse esforço foram registrados na Tabela 20 e na Figura 20.

Tabela 20 - Comparação entre Perfis de Impactos Ambientais da produção de 1,0 kg aço líquido para todas as categorias de impacto avaliadas – etapas inerentes ao processo

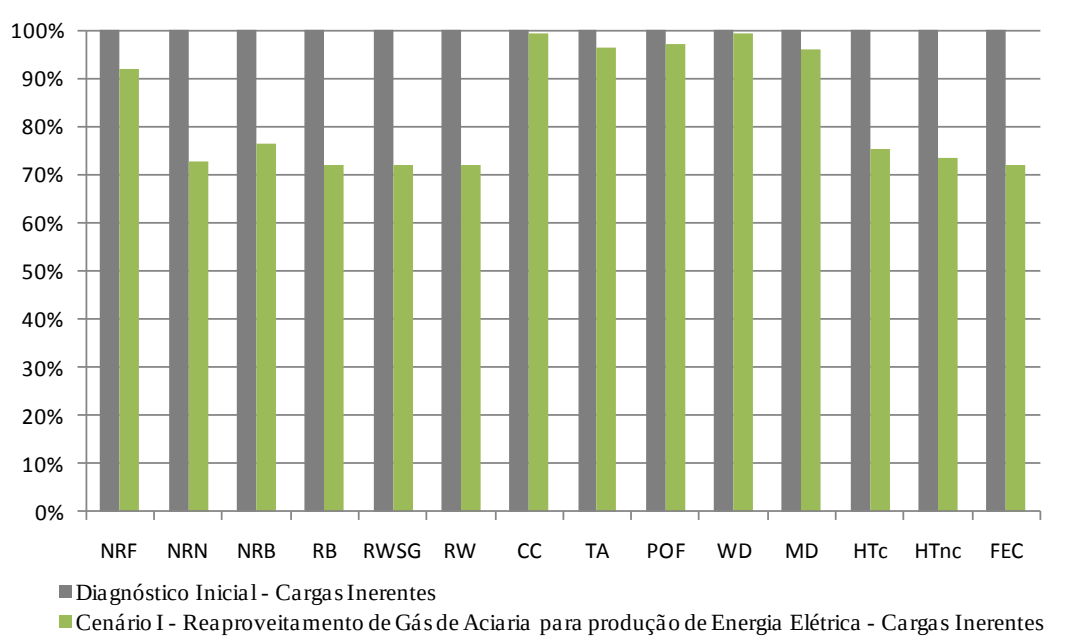
Método de AICV	**Categoria de impacto**	**Unidade**	**Impactos: Diagnóstico Inicial**		**Impactos: Cenário I**	
			Surplus	**Alocação Mássica**	**Surplus**	**Alocação Mássica**
CED	NRF	MJ	1,27	8,52E-01	1,17	7,83E-01
	NRN	MJ	1,40E-01	9,39E-02	1,02E-01	6,83E-02
	NRB	MJ	2,09E-08	1,39E-08	1,58E-08	1,06E-08
	RB	MJ	3,99E-02	2,67E-02	2,87E-02	1,92E-02
	RWSG	MJ	1,11E-02	7,44E-03	0,80E-02	5,37E-03
	RW	MJ	9,29E-01	6,21E-01	6,70E-01	4,48E-01
	TOTAL	MJ	2,39	1,60	1,98	1,32
ReCiPe	CC	kg $CO_{2\ eq}$	1,33	8,89E-01	1,32	8,85E-01
	TA	kg $SO_{2\ eq}$	5,94E-04	3,97E-04	5,73E-04	3,83E-04
	POF	kg NMVOC	4,92E-04	3,29E-04	4,78E-04	3,19E-04
	WD	L	36,9	24,7	36,7	24,6
	MD	kg Fe_{eq}	6,37E-06	4,26E-06	6,11E-06	4,09E-06
USEtox	HT_C	CTUh	1,36E-12	9,09E-13	1,02E-12	6,85E-13
	HT_{NC}	CTUh	2,33E-14	1,55E-14	1,71E-14	1,14E-14
	FEC	CTUe	7,40E-03	4,95E-03	5,33E-03	3,57E-03

No âmbito das etapas inerentes ao processo percebem-se reduções expressivas de impactos em termos de PED e toxicidade, a partir da substituição parcial da energia elétrica procedente da matriz energética brasileira por cogeração via queima de gás de aciaria. Como não poderia deixar de ser, todas as categorias de impacto energéticas sofreram redução com a formulação do Cenário I. Estas foram menos significantes em termos de NRF (de 8,0 %) mas, para as demais o decréscimo oscilou entre 24 e 28 %. Destaque-se nesse caso o efeito da pequena

magnitude de escala das contribuições que invariavelmente as torna mais suscetíveis a quaisquer variações.

Os efeitos sobre HTc, HT_{NC} e FEC seguiram a mesma tendência, ao resultarem em abatimentos de 25 %, 27 % e 28 % respectivamente. Para os demais impactos analisados a revalorização do gás de aciaria foi praticamente invariável quando observada no âmbito dos processos inerentes.

Figura 20 - Comparação de perfis ambientais da produção de Aço Líquido: Cenário Base vs Cenário I – etapas inerentes ao processo



Comparação 1 kg de Aço Líquido Produzido no Diagnóstico Inicial *versus* 1 kg de Aço Líquido produzido no Cenário 1, ambos através do método Surplus e Alocação Mássica
Métodos de AICV: Cumulative Energy Demand v1.09 / Cumulative Energy Demand; Recipe Midpoint (H) v1.12 /Europe Recipe H; USEtox (consensus only) v1.04 / Europe 2004

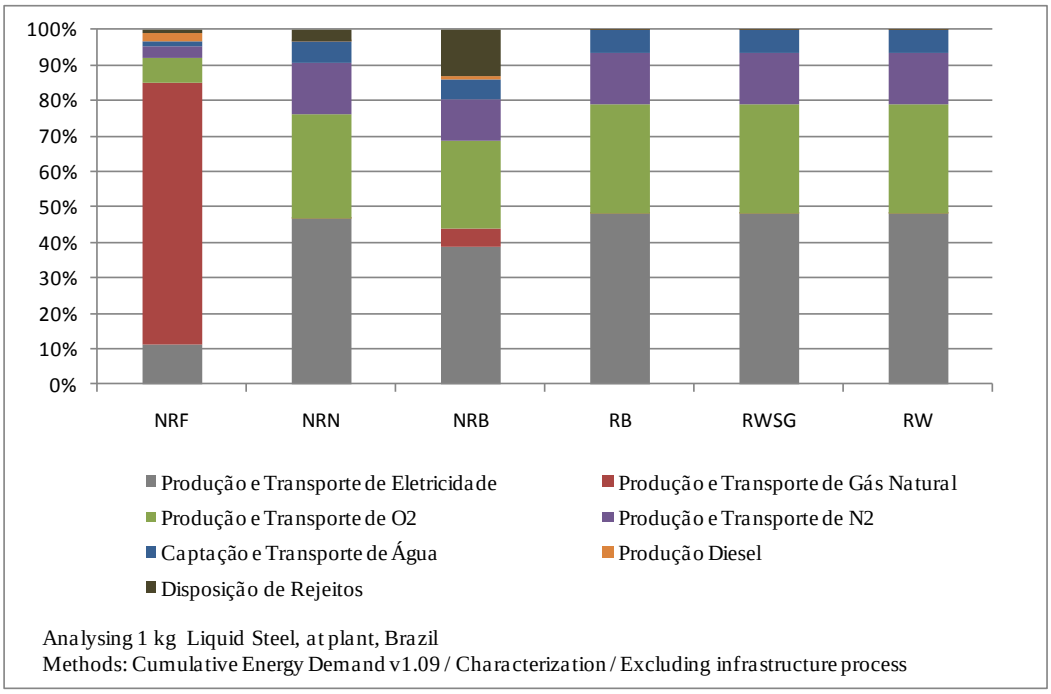
9.1.3.1 Demanda de Energia Primária (PED) – Cenário I

De acordo com os dados registrados na Tabela 20, a implementação do Cenário I promoveu uma redução acumulada de 17 % no valor de PED do cenário original. Além disso, mantendo o diapasão observado durante a Análise de Sensibilidade, a aplicação do Surplus Method faz atribuir 1,98 MJ/FR para a PED acumulada pelos processos inerentes do Cenário I, ao passo que, se a situação de multifuncionalidade entre produtos fosse abordada em termos de alocação mássica esse valor se reduziria a 1,32 MJ/FR.

A categoria NRF apresenta significativa participação na demanda de energia, com 59 % do total de PED. Como explicitado na Figura 21, as etapas com maior participação neste consumo são a produção e o transporte de gás natural que juntas, representam 74 % das contribuições para a categoria. Deste total, 42 % estão associados ao gás natural importado da Bolívia, e o restante, das operações de realizadas na Bacia de Campos, no estado do Rio de Janeiro.

Outros 34 % da PED remetem a impactos na forma de RW. A plenitude dos 31 % de contribuição imputados à produção de O_2 refere-se à energia de procedência hidroelétrica que foi consumida na compressão do gás.

Figura 21 - Perfil de impacto ambiental de cargas inerentes em termos de PED para a produção de 1 kg aço – Cenário I



Em termos de contribuições por etapas do processo, destacam-se para efeito de PED a produção de gás natural, com 44 % de contribuições individuais, ao que se seguem geração de eletricidade (26 %) e produção de O_2 (17 %).

De qualquer forma, o resultado mais expressivo proporcionado pelo Cenário I se dá de fato, em termos de consumo de energia elétrica. O reaproveitamento de gás de Aciaria para cogeração elétrica reduziu em cerca de 45 % – de 932 kJ/FR (Tabela 3) para 516 kJ/RF (Tabela 21) – a dependência que, o processamento de aço em si, tem com a matriz elétrica nacional. Em termos estratificados esse efeito se traduz em abatimentos de 8,2 % em termos

de NRF, 27 % no que se refere a NRN, 24 % para NRB, e 28 % para RB, RWSG e RW (Figura 20). De maneira geral a PED das etapas inerentes ao processamento de aço regrediu em 17 % com relação ao seu valor original. Aparte de NRF, todas as reduções de impacto, aparentemente expressivas, se deram sobre categorias que detinham contribuições absolutas discretas, as quais, por isso mesmo, são mais suscestíveis a quaisquer variações. Destaque-se, por fim que os métodos de tratamento de multifuncionalidades mantiveram perfis semelhantes (Tabelas 21 e 22) àqueles obtidos para o diagnóstico inicial.

Tabela 21 - Avaliação de desempenho da produção de aço líquido em termos de Demanda de Energia Primária (PED) Cenário I – Cargas Inerentes – tratamento de multifuncionalidades por *Surplus Method*.

Método Surplus									
Categoria de Impacto	Unit	Total	Produção e Transporte de Eletricidade	Produção e Transporte de Gás Natural	Produção e Transporte de O_2	Produção e Transporte de N_2	Captação e Transporte de Água	Produção Diesel	Disposição de Rejeitos
NRF	MJ	1,17	1,29E-01	8,62E-01	8,24E-02	3,91E-02	1,79E-02	2,49E-02	1,42E-02
NRN	MJ	1,02E-01	4,75E-02	4,17E-05	3,03E-02	1,44E-02	6,58E-03	3,58E-05	3,23E-03
NRB	MJ	1,58E-08	6,11E-09	8,49E-10	3,89E-09	1,85E-09	8,46E-10	1,67E-10	2,08E-09
RB	MJ	2,87E-02	1,38E-02	1,49E-05	8,80E-03	4,17E-03	1,91E-03	9,15E-06	3,18E-05
RWSG	MJ	8,03E-03	3,85E-03	2,90E-06	2,46E-03	1,17E-03	5,34E-04	2,60E-06	1,11E-05
RW	MJ	6,70E-01	3,22E-01	3,15E-04	2,05E-01	9,73E-02	4,46E-02	2,10E-04	8,03E-04
Total	MJ	1,98	5,16E-01	8,62E-01	3,29E-01	1,56E-01	7,15E-02	2,52E-02	1,83E-02

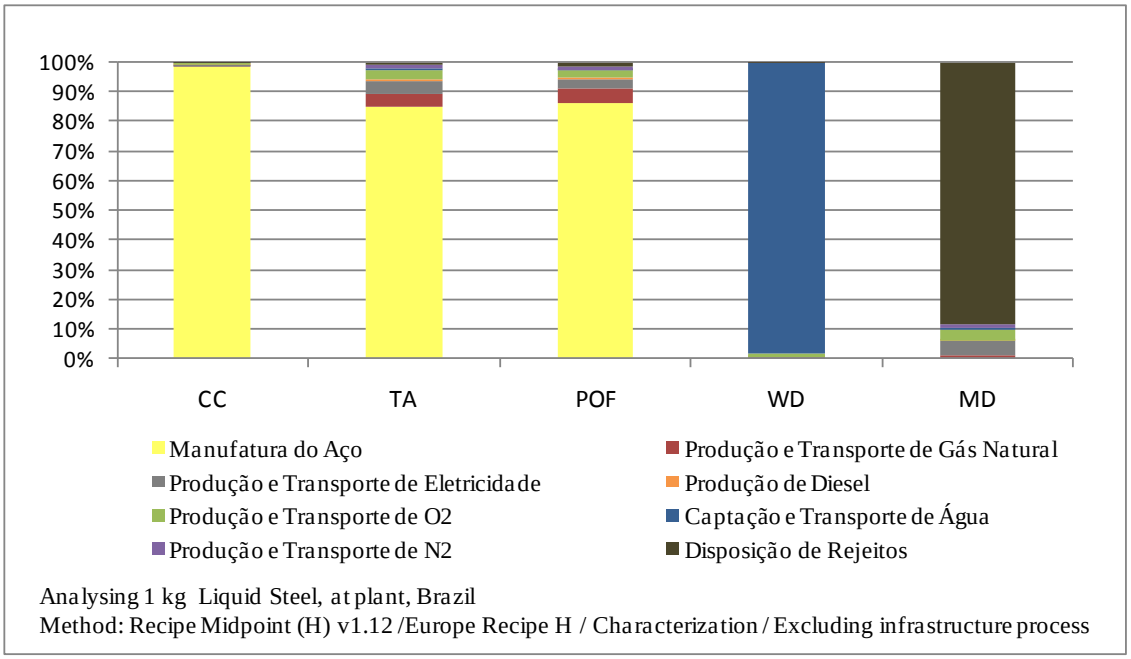
Tabela 22 - Avaliação de desempenho da produção de aço líquido em termos de Demanda de Energia Primária (PED) Cenário I – Cargas Inerentes - tratamento de multifuncionalidades por alocação mássica.

Método Alocação Mássica									
Categoria de Impacto	Unit	Total	Produção e Transporte de Eletricidade	Produção e Transporte de Gás Natural	Produção e Transporte de O_2	Produção e Transporte de N_2	Captação e Transporte de Água	Produção Diesel	Disposição de Rejeitos
NRF	MJ	7,83E-01	8,65E-02	5,77E-01	5,51E-02	2,61E-02	1,20E-02	1,67E-02	9,48E-03
NRN	MJ	6,83E-02	3,18E-02	2,79E-05	2,03E-02	9,62E-03	4,40E-03	2,39E-05	2,16E-03
NRB	MJ	1,06E-08	4,09E-09	5,68E-10	2,60E-09	1,24E-09	5,66E-10	1,12E-10	1,39E-09
RB	MJ	1,92E-02	9,24E-03	9,99E-06	5,89E-03	2,79E-03	1,28E-03	6,12E-06	2,13E-05
RWSG	MJ	5,37E-03	2,58E-03	1,94E-06	1,64E-03	7,80E-04	3,57E-04	1,74E-06	7,45E-06
RW	MJ	4,48E-01	2,15E-01	2,11E-04	1,37E-01	6,51E-02	2,98E-02	1,41E-04	5,37E-04
Total	MJ	1,32	3,45E-01	5,77E-01	2,20E-01	1,04E-01	4,78E-02	1,69E-02	1,22E-02

9.1.3.2 Impactos Ambientais Decorrentes das Emissões – Cenário I

As modificações introduzidas pelo Cenário I resultaram em alterações pouco significativas dos perfis de impactos de CC, TA, POF, WD e MD em relação aos desempenhos registrados pelo diagnóstico inicial (Figura 20) mesmo tratando-se apenas de cargas inerentes ao processamento. Além disso, a implementação de cogeração de eletricidade via gás de Aciaria não alterou uma característica marcante do perfil original do processo em termos de cargas inerentes. Os dados das Figuras 13 e 22 revelam grande supremacia da manufatura do aço em termos de impactos como CC, TA e POF, de captação e transporte de água quanto a WD (que aliás, já seria de fato esperado), e disposição de rejeitos em termos de MD. Quanto a este efeito em particular, vale frisar mais uma vez o efeito das perdas decorrentes da lavra de recursos minerais que dada a circunstância passam a ser os principais precursores de impacto de MD.

Figura 22 - Perfil de impacto ambiental decorrentes de emissões inerentes a produção de 1,0 kg de aço líquido – Cenário I.



O Cenário I proporciona uma redução discreta (0,49 %) de impactos como CC em relação ao desempenho do diagnóstico inicial. Em termos absolutos as retrações foram de 6,53 gCO_{2eq}/ kg aço para o caso de a multifuncionalidade entre produtos ser tratada pelo *Surplus Method*, e de 4,37 gCO_{2eq}/kg via alocação mássica. A pouca efetividade das alterações introduzidas pelo Cenário I para CC se deve ao fato destas medidas não atuarem sobre emissões diretas da manufatura do aço, que respondem por cerca de 98 % das contribuições totais para a categoria

(Figura 21). Emissões atmosféricas de CO_2 seguem sendo os principais precursores deste efeito ambiental. No Cenário I, essas perdas passaram a aportar perto de 96 % do total de emissão da categoria (*Surplus Method*: 1,29 g/kg; Alocação mássica: 850 mg/kg). Ainda que de mais longe, aparecem também contribuições decorrentes de lançamentos de N_2O (4,0 %) as quais totalizam, nessa ordem, 180 mg /kg (*Surplus Method*) e 120 mg/ kg (alocação mássica).

A redução nas emissões de CO_2 vincula-se diretamente à desocupação, mesmo que parcial, da matriz nacional pelo sistema. As perdas de CO_2 da geração de eletricidade passaram a contribuir para o sistema com 16 g/kg aço (*Surplus Method*) e 11 g/kg (alocação mássica); já as perdas para o ar de N_2O montam 880 μg/kg (*Surplus Method*) e 590 μg/kg (alocação mássica).

Para TA constata-se uma redução de 3,5 % do desempenho do Cenário I sobre o do diagnóstico inicial. As perdas de $SO_{x\,(g)}$ e $NO_{x\,(g)}$ continuam contribuindo com a maior parcela de impacto desta categoria: 53 % e 36 %, respectivamente.

Assim como já ocorrera com CC o Cenário I não teve influência sobre os principais focos de geração de impacto da categoria: manufatura do aço (85 % dos impactos totais), em detrimento da produção de O_2, e a geração de eletricidade (ambos com 5,0 % de participação). Ao processamento do aço se atribui a quase plenitude das emissões de SO_x do sistema, além de 86 % de suas emanações de NO_x. Complementam a perda de NO_x contribuições que decorrem das combustões de gás natural (2,9 %), carvão (2,1 %), óleo pesado (1,7 %) e bagaço de cana (0,90 %) que derivam da fração de termoeletricidade da matriz brasileira. As retrações nas perdas aéreas de CO_2, N_2O, SO_x e NO_x devem-se em grande parte ao fato de a matriz energética nacional contar, em 2012, com 13 % de fontes fósseis, dos quais 62 % referem-se a gás natural, 26 % a petróleo e derivados, e 12 % restantes a carvão (EPE, 2013).

A manufatura do aço responde por 86 % do total de impacto de POF. A esta se seguem produção e transporte de O_2 (5,0 %) e produção e transporte de eletricidade (3,0 %). No entanto, uma parte importante do impacto associado à produção de O_2 também remete ao consumo de eletricidade. Com relação a essa etapa do sistema em específico, a queima de combustíveis aporta 6,9 % das contribuições para a categoria, por conta de emissões de NO_x. Os óxidos de nitrogênio são também os principais agentes precursores nesse caso (77 % de contribuição), seguidos por NMVOCs (11 %). Perdas de NMVOC correspondem a 53 mg/ kg

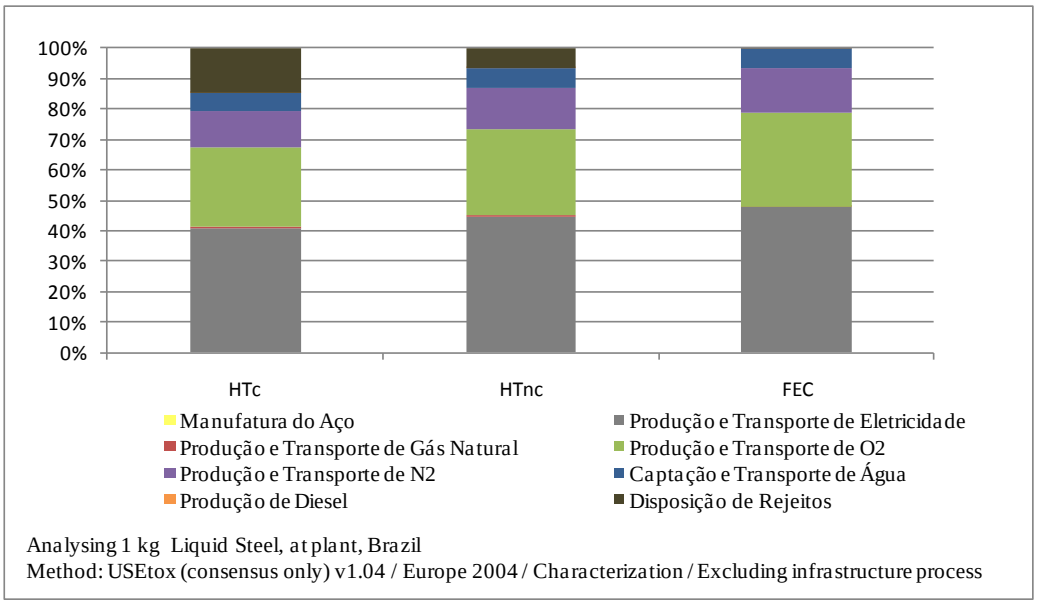
aço (*Surplus Method*), e 36 mg/ kg (alocação mássica). Tais lançamentos estão distribuídos entre a manufatura do aço (55 %), e a produção gás natural (35 %).

A implementação do Cenário I não traz alterações no consumo específico de água associado a manufatura do aço. As reduções, inclusive de escala superficial, que o arranjo gera em termos de WD (*Surplus Method*: 200 mL/kg aço; alocação mássica: 100 mL/kg) estão ligadas, em verdade, mais uma vez à redução de consumo de eletricidade da rede concessionária, por conta de umidade presente no carvão, e via óleo pesado usados pela matriz nacional. Por intermédio do carvão são introduzidos no sistema 140 mL/ kg aço (*Surplus Method*) que se transformam em 90 mL/kg quando observados sob a ótica da alocação mássica. Já o processamento de óleo pesado predispõe depleções hídricas de 280 mL/ kg e 190 mL/ kg aço dependendo do método de tratamento de multifuncionalidade selecionado.

Quando o sistema opera segundo a lógica processual estabelecida no Cenário I constatam-se reduções em termos de toxicidade humana e ecotoxicidade em relação à condição de referência. Estas são da ordem de 25 % para HT_C, 26 % para HT_{NC}, e 28 % quanto a FEC (Figura 20).

Juntas, a geração de eletricidade e a produção de O_2 aportam entre 67 % e 79 % dos totais obtidos para esses impactos ambientais, assim como pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 - Perfil de impacto ambiental de cargas inerentes para a produção de 1 kg de aço líquido em termos de toxicidade – Cenário I.



A redução de 0,34E-12 CTUh (*Surplus Method*) de impacto em termos de HTc (que seriam de 0,22E-12 CTUh via alocação mássica) em relação ao cenário de referência também se vincula ao menor consumo de energia elétrica da rede. Isso ocorre porque a redução de consumo elétrico gerada pelo Cenário I resultam em decréscimo de emissões para o ar de CH_2O, originada da queima de óleo pesado, e TCDD e C_6H_6, procedentes da combustão de bagaço de cana. A queima de óleo pesado emite 60 % de todo CH_2O emanado do processo, ao passo que a queima de bagaço é a principal atividade contribuinte da emissão de TCDD e C_6H_6 com 16% e 60 % das emissões desses poluentes respectivamente. Para este cenário a emissão específica de CH_2O passou a ser de 34 µg /kg aço (*Surplus Method*; que seriam de 23 µg/kg para alocações por critério mássico). Já a emissão de TCDD fica em 5,2 pg/kg e 3,5 pg/kg para *Surplus Method* e alocação mássica, respectivamente. Por fim, no caso do C_6H_6 essas remetem a 50 µg/kg e 30 µg/kg.

A produção de eletricidade tem também contribuição expressiva para HT_{NC}. Para essa categoria a queima de óleo pesado contribui com 7,0 µg Acetaldeído/kg aço (*Surplus Method*), ou 5,0 µg /kg por alocação mássica, ou seja, cerca de 70 % das emissões totais desse precursor. Além disso, destaca-se também a emissão de $C_6H_5CH_3$ (*Surplus Method*: 20 µg/kg aço; alocação mássica: 13 µg/kg) geradas em 39 % da queima de bagaço-de-cana. Outro precursor importante de HT_{NC} é o tetracloreto de carbono, ou CFC-10 (*Surplus Method*: 10 ng/kg aço; alocação mássica: 7,0 ng/kg) cuja queima de bagaço-de-cana é principal responsável pela emissão (85 %).

O menor consumo de eletricidade do grid reduz a utilização de pesticidas para o cultivo de cana, ação que se reflete diretamente em termos de FEC. Assim, com a implementação do Cenário I as emissões de ametrina, são reduzidas a 560 µg/kg (*Surplus Method*) e 370 µg/kg (alocação mássica). Isso ocorre também com diruon 520 µg/kg (*Surplus Method*) e 350 µg/kg (alocação mássica) e clomazone (410 µg/kg: *Surplus Method* e 270 µg/kg: alocação mássica).

9.2 Cenário II: Apagamento a Seco do Coque "Coke Dry Quenching (CDQ)"

9.2.1 Definição de Objetivo e Escopo

A análise que leva em conta o Cenário II baseia-se também no conteúdo da norma ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2009) de enfoque atribucional e para escopo de aplicação do 'berço-ao-portão'. Nesses termos, a avaliação seguiu os mesmos preceitos estabelecidos para aquela que a precedeu em termos de estabelecimento do Fluxo de Referência, Critérios de Exclusão,

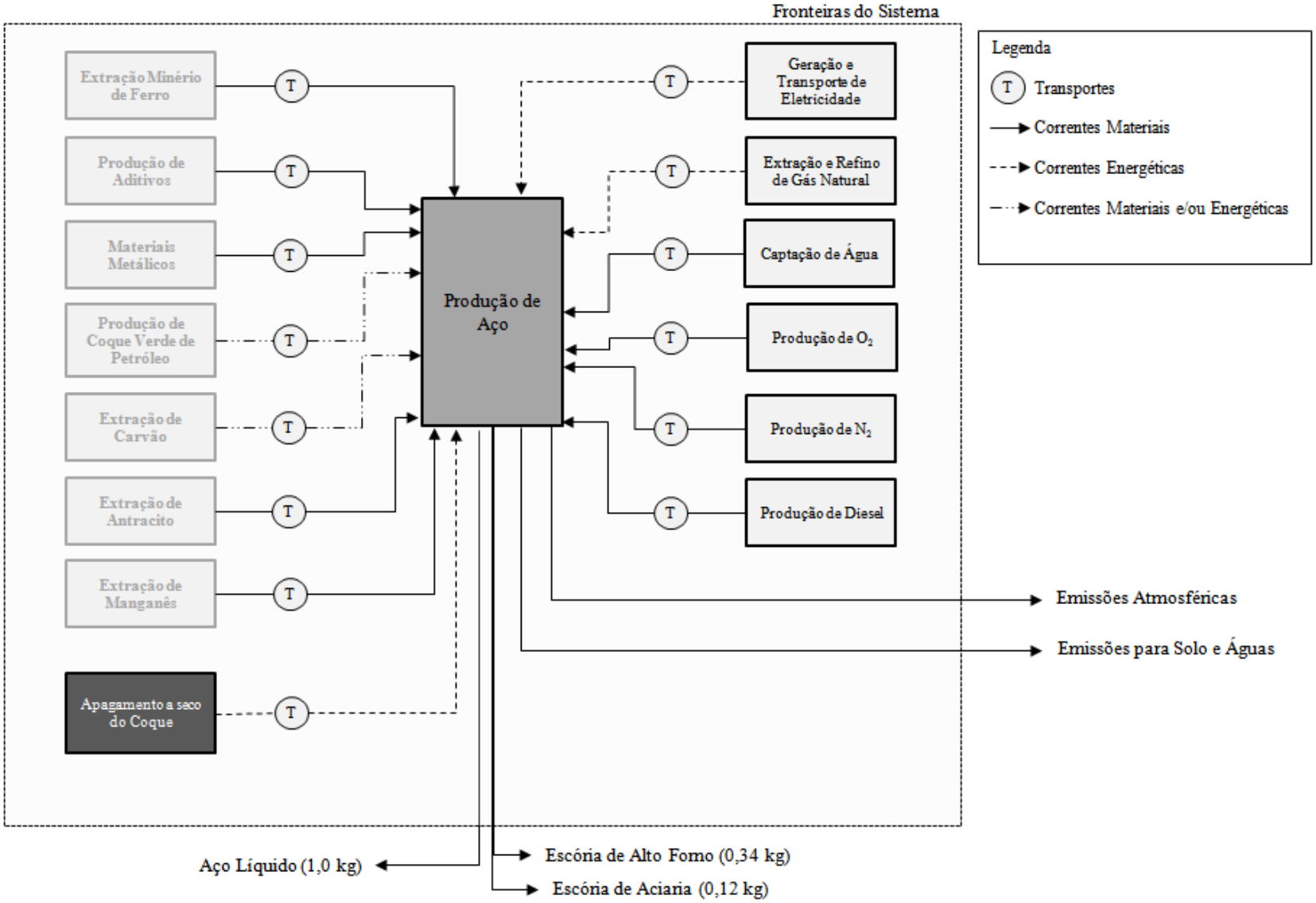
Tratamento de Multifuncionalidades, e Métodos de AICV e categorias de impacto. Tais ditames coadunam também com as bases outrora estabelecidas para formulação do diagnóstico inicial do processo, sendo conduzidos dessa forma a permitir comparações com aquela referência.

Algumas particularizações foram, porém, realizadas para a situação presente. Estas são expressas a seguir. No que se refere aos *Objetivos*, a análise se propõe a verificar se o apagamento a seco do coque (CDQ) se reverte, de fato, em melhoria de desempenho ambiental da produção de aço líquido.

Quanto ao *Tipo de dados* foram utilizados dados primários para expressar consumos e emissões de matéria e energia do processo de produção de aço. As características e condicionantes desse processo estão descritas na seção 5.1. A modelagem do processo de CDQ ocorreu a partir de dados secundários e seguiu recortes processuais descritos na seção 8.2. Outros aspectos de *Qualidade dos Dados* mantiveram o padrão de rigor dispensado aos demais cenários.

A Figura 24 descreve em detalhes as características do sistema de produto para o qual a modificação gerada pelo Cenário II já foi implementada.

Figura 24 - Sistema de Produto e respectivas fronteiras – Cenário II



9.2.2 Inventário de Ciclo de Vida – Cenário II

A Tabela 23 apresenta valores de consumos e emissões referentes à produção de 1,0 kg nas condições praticadas no Cenário II de análise.

Tabela 23 - Inventário simplificado da produção de 1,0 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial vs. Cenário II.

Produto		
Aço líquido (kg)	1,00	1,00
	Diagnóstico Inicial	Cenário II
Entradas Materiais		
Minério de Ferro (kg)	1,47	1,47
Carvão mineral e CVP (kg)	6,80E-01	6,80E-01
Antracito (kg)	4,90E-02	4,90E-02
Minério de Manganês (Mn) (kg)	4,70E-02	4,70E-02
Materiais e aparas metálicas (kg)	1,10E-02	1,10E-02
Aditivos de processo (kg)	3,50E-01	3,50E-01
Oxigênio líquido ($O_{2(l)}$) (kg)	4,40E-02	4,40E-02
Nitrogênio líquido ($N_{2(l)}$) (kg)	3,90E-02	3,90E-02
Água de processo (L)	35,83	35,68
Óleo Diesel (L)	6,00E-04	6,00E-04
Instalações e equipamentos (P)	1,33E-11	1,33E-11
Entradas Energéticas		
Gás Natural (MJ)	7,70E-01	7,70E-01
Eletricidade (kWh)	1,90E-01	1,20E-01
Saídas		
Emissões para o Ar		
Dióxido de carbono (CO_2) (fóssil) (kg)	1,25	1,25
Monóxido de carbono (CO) (fóssil) (kg)	6,00E-04	5,30E-03
Energia residual (calor) (MJ)	9,69E-01	9,69E-01
Óxidos de Nitrogênio (expresso como NOx) (kg)	3,30E-04	3,30E-04
Óxidos de Enxofre (expresso como SOx) (kg)	3,00E-04	3,00E-04
Compostos Orgânicos Voláteis (kg)	3,00E-05	3,00E-05
Material particulado, $\varphi < 2.5$ µm (kg)	2,20E-04	2,20E-04
Óxido Nitroso (kg)	1,79E-04	1,79E-04
Rejeitos para tratamento		
Restos metálicos de processo - aterro sanitário (kg)	1,18E-02	1,18E-02

9.2.3 Resultados e Discussão – Cenário II

A Tabela 24 compara os resultados dos impactos ambientais de cargas totais proporcionados pela modificação de processo introduzida no Cenário II com aqueles gerados pela condição original de processo, que doravante também serão referidos como 'Impactos: Diagnóstico Inicial'.

Tabela 24 - Comparação entre Perfis de Impactos Ambientais da produção de 1,0 kg aço líquido para todas as categorias de impacto avaliadas – cargas totais do processo

Método de AICV	Categoria de impacto	Unidade	Impactos: Diagnóstico Inicial		Impactos: Cenário II	
			Surplus Method	Alocação Mássica	Surplus Method	Alocação Mássica
CED	NRF	MJ	25,63	17,15	25,55	17,09
	NRN	MJ	4,97E-01	3,33E-01	4,66E-01	3,12E-01
	NRB	MJ	4,63E-07	3,10E-07	4,59E-07	3,07E-07
	RB	MJ	5,55E-02	3,71E-02	4,65E-02	3,11E-02
	RWSG	MJ	1,82E-02	1,22E-02	1,57E-02	1,05E-02
	RW	MJ	1,05	7,04E-01	8,43E-01	5,64E-01
	TOTAL	MJ	27,26	18,23	26,92	18,01
ReCiPe	CC	kg $CO_{2\ eq}$	1,56	1,04	1,55	1,04
	TA	kg $SO_{2\ eq}$	3,39E-03	2,27E-03	3,37E-03	2,25E-03
	POF	kg NMVOC	3,47E-03	2,32E-03	3,67E-03	2,46E-03
	WD	L	39,9	26,7	39,6	26,5
	MD	kg Fe_{eq}	2,88	1,93	2,88	1,93
USEtox	HT_C	CTUh	4,04E-12	2,71E-12	3,77E-12	2,52E-12
	HT_{NC}	CTUh	1,63E-13	1,09E-13	1,58E-13	1,06E-13
	FEC	CTUe	8,56E-03	5,73E-03	6,89E-03	4,61E-03

O perfil de impacto do Cenário II relativizado em relação àquele observado para o diagnóstico inicial (Figura 25) mostra também resultados discretos. Tal como já ocorrera com o Cenário I, as mudanças que foram implementadas também neste caso não se revertem em benefícios significantes de amplitude sistêmica. Estas ocorreram em termos energéticos para NRN, RB, RWSG e RW. Já no que se refere a emissões, os ganhos aparecem quanto a HT_C, HT_{NC} e FEC. Por outro lado, percebeu-se incremento em termos de POF. A partir dessa constatação, o estudo foi mais uma vez retificado a fim de verificar apenas o efeito do CDQ sobre as etapas

inerentes ao processo. Os resultados dessa abordagem aparecem descritos na Tabela 25 e Figura 26.

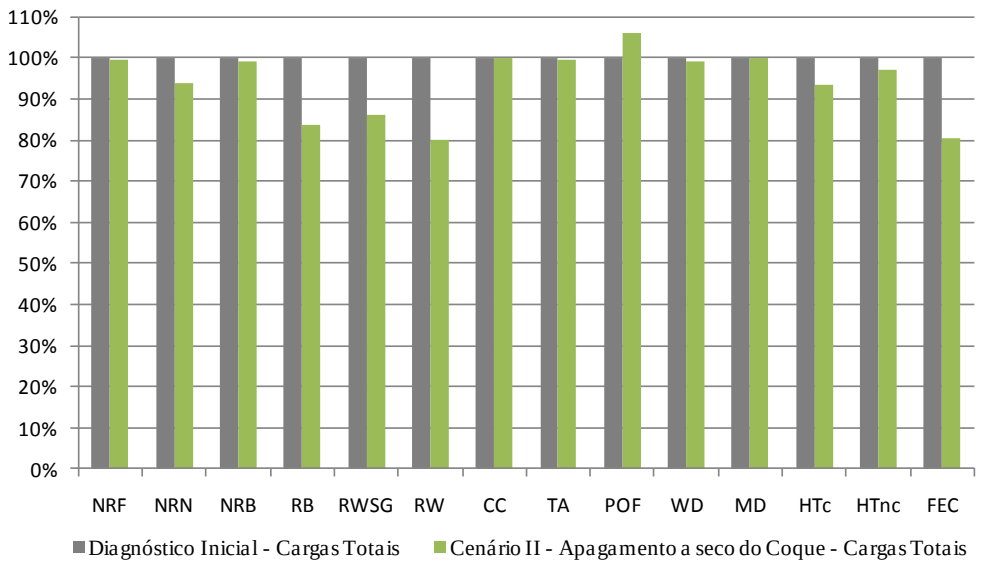
Também nesse caso a tendência dos resultados encontrados para o Cenário II assemelha-se ao obtido para o Cenário I. A avaliação dos impactos inerentes ao processamento em si de aço, resultou em reduções em termos de NRN (22 %), NRB (19 %), HTc (20 %) e HT_{NC} (22 %).

Tabela 25 - Comparação entre Perfis de Impactos Ambientais da produção de 1,0 kg aço líquido para todas as categorias de impacto avaliadas – etapas inerentes ao processo

Método de AICV	Categoria de impacto	Unidade	Impactos: Diagnóstico Inicial		Impactos: Cenário II	
			Surplus	Alocação Mássica	Surplus	Alocação Mássica
CED	NRF	MJ	1,27	8,52E-01	1,19	7,96E-01
	NRN	MJ	1,40E-01	9,39E-02	1,09E-02	7,30E-02
	NRB	MJ	2,09E-08	1,39E-08	1,67E-08	1,12E-08
	RB	MJ	3,99E-02	2,67E-02	3,08E-02	2,06E-02
	RWSG	MJ	1,11E-02	7,44E-03	8,60E-03	5,76E-03
	RW	MJ	9,29E-01	6,21E-01	7,19E-01	4,81E-01
	TOTAL	MJ	2,39	1,60	2,06	1,38
ReCiPe	CC	kg $CO_{2\ eq}$	1,33	8,89E-01	1,33	8,87E-01
	TA	kg $SO_{2\ eq}$	5,94E-04	3,97E-04	5,77E-04	3,86E-04
	POF	kg NMVOC	4,92E-04	3,29E-04	6,96E-04	4,65E-04
	WD	L	36,9	24,7	36,6	24,5
	MD	kg Fe_{eq}	6,37E-06	4,26E-06	6,16E-06	4,12E-06
USEtox	HT_C	CTUh	1,36E-12	9,09E-13	1,09E-12	7,27E-13
	HT_{NC}	CTUh	2,33E-14	1,55E-14	1,83E-14	1,22E-14
	FEC	CTUe	7,40E-03	4,95E-03	5,72E-03	3,83E-03

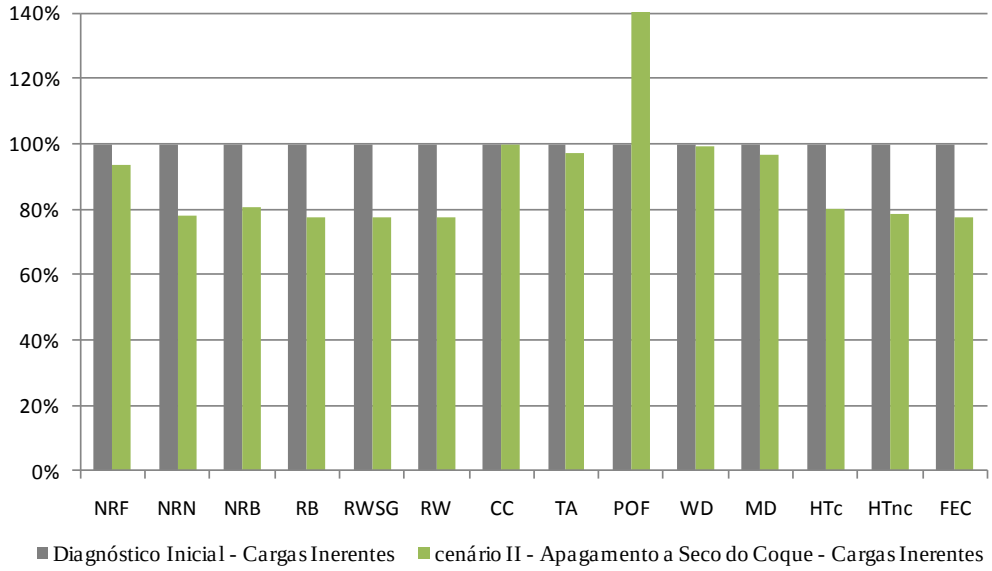
Os impactos como POF se elevaram em 5,9 % quando a comparação entre o Cenário II e o diagnóstico inicial ocorreu para toda a cadeia produtiva do aço. No entanto, quando a análise ficou restrita apenas às etapas inerentes ao processo o ônus foi de 42 % (Figuras 24 e 25) o que indica que a adoção do CDQ é pouco recomendável em termos dos efeitos para essa categoria.

Figura 25 - Comparação de perfis ambientais da produção de Aço Líquido Cenário II vs Cenário Base – cargas totais do processo



Comparação 1 kg de Aço Líquido Produzido no Diagnóstico Inicial *versus* 1 kg de Aço Líquido produzido no Cenário I, ambos através do método Surplus e Alocação Mássica
Métodos de AICV: Cumulative Energy Demand v1.09 / Cumulative Energy Demand; Recipe Midpoint (H) v1.12 /Europe Recipe H; USEtox (consensus only) v1.04 / Europe 2004

Figura 26 - Comparação de perfis ambientais da produção de Aço Líquido: Cenário Base vs Cenário II – etapas inerentes ao processo.



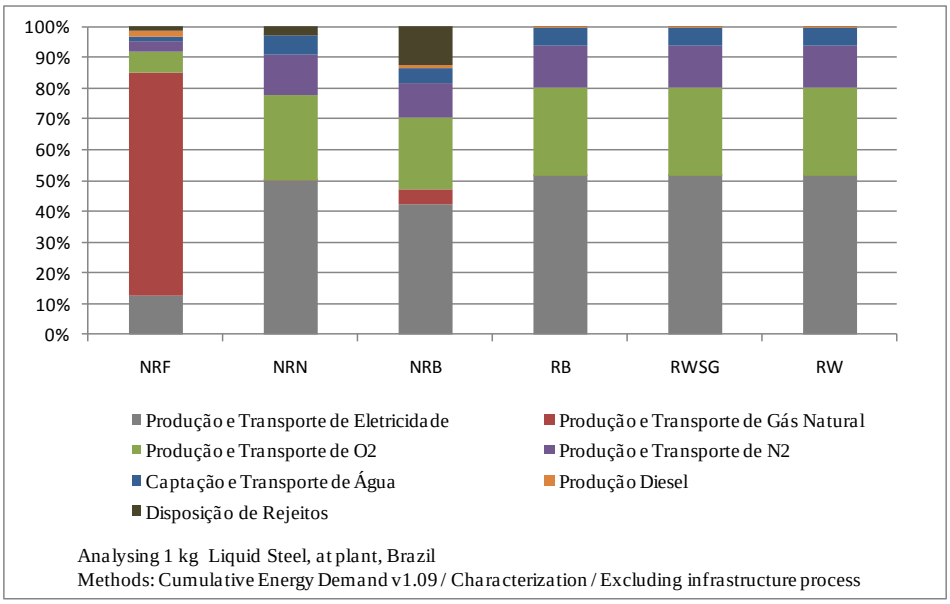
Comparação 1 kg de Aço Líquido Produzido no Diagnóstico Inicial *versus* 1 kg de Aço Líquido produzido no Cenário 1, ambos através do método Surplus e Alocação Mássica
Métodos de AICV: Cumulative Energy Demand v1.09 / Cumulative Energy Demand; Recipe Midpoint (H) v1.12 /Europe Recipe H; USEtox (consensus only) v1.04 / Europe 2004

9.2.3.1 Demanda Primária de Energia – Cenário II

As alterações propostas pelo Cenário II reduzem em 14 % a PED das operações inerentes ao processo. A partir do uso de CDQ esse valor passa a ser de 2,06 MJ/FR multifuncionalidade por meio de *Surplus Method*, ou 1,38 MJ/FR quando a solução para essa situação ocorrer por alocação mássica (Tabela 25). As maiores reduções ocorrem em termos de fontes renováveis (RB, RWSG e RW) e são da ordem de 23 % em todos os casos. Vêm a seguir os impactos de NRN (decréscimo de 22 %), NRB (19 %) e NRF (6,6 %).

Embora tenha sofrido a menor redução percentual, NRF continua com participação de 58 % no total de PED. A produção e transporte de gás natural responde por 73 % desta contribuição, dos quais 58 % procedem da extração de gás natural no litoral do Rio de Janeiro, e o restante, da exploração do recurso fóssil na Bolívia. Além disso, cerca de 35 % da PED associada ao Cenário II concentra-se em RW, especificamente por conta de geração via modal hidroelétrico.

Figura 27 - Perfil de impacto ambiental de cargas inerentes em termos de PED para a produção de 1 kg aço – Cenário II.



De maneira semelhante ao que ocorrera com o Cenário I o aproveitamento de energia alternativa leva, no caso presente, a um consumo 36 % menor de energia da matriz nacional em relação ao cenário de referência para as etapas inerentes ao processo. Tal redução está detalhada em termos absolutos, por etapa inerente ao sistema em análise e, respectivamente com aplicação de *Surplus Method* e alocação mássica em situações de multifuncionalidade nas Tabelas 26 e 27.

A redução do consumo de energia elétrica proveniente da rede concessionária leva a mudanças de composição de perfil energético do sistema por categoria de impacto. Com a implementação do Cenário II, a produção e transporte de eletricidade passa a ter 13 % de participação em NRF, 50 % em NRN, 42 % em NRB e cerca de 52 % em RB, RWSW e RW (Figura 27).

Tabela 26 - Avaliação de desempenho da produção de aço líquido em termos de Demanda de Energia Primária (PED) Cenário II – Cargas Inerentes – tratamento de multifuncionalidades por *Surplus Method*

Método Surplus									
Categoria de Impacto	Unit	Total	Produção e Transporte de Eletricidade	Produção e Transporte de Gás Natural	Produção e Transporte de O_2	Produção e Transporte de N_2	Captação e Transporte de Água	Produção Diesel	Disposição de Rejeitos
NRF	MJ	1,19	1,49E-01	8,62E-01	8,24E-02	3,91E-02	1,77E-02	2,49E-02	1,42E-02
NRN	MJ	1,09E-01	5,48E-02	4,17E-05	3,03E-02	1,44E-02	6,52E-03	3,58E-05	3,23E-03
NRB	MJ	1,67E-08	7,04E-09	8,49E-10	3,89E-09	1,85E-09	8,37E-10	1,67E-10	2,08E-09
RB	MJ	3,08E-02	1,59E-02	1,49E-05	8,80E-03	4,18E-03	1,89E-03	9,15E-06	3,18E-05
RWSG	MJ	8,61E-03	4,44E-03	2,90E-06	2,46E-03	1,17E-03	5,28E-04	2,60E-06	1,11E-05
RW	MJ	7,19E-01	3,71E-01	3,15E-04	2,05E-01	9,73E-02	4,41E-02	2,10E-04	8,03E-04
Total	MJ	2,06	5,95E-01	8,62E-01	3,29E-01	1,56E-01	7,08E-02	2,52E-02	1,83E-02

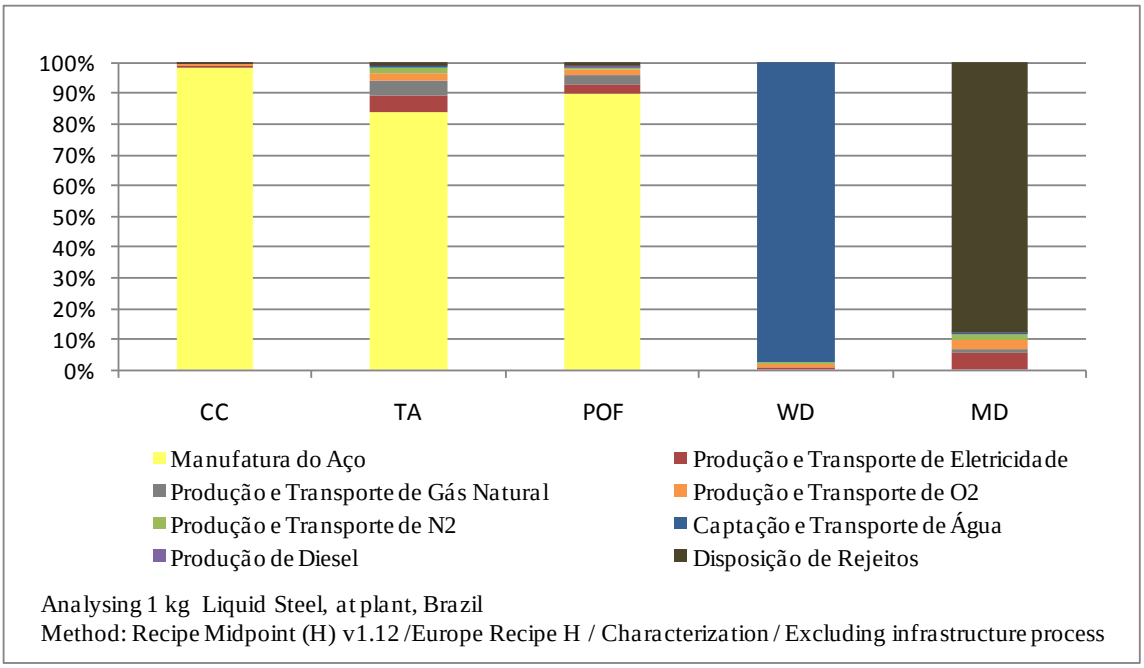
Tabela 27 - Avaliação de desempenho da produção de aço líquido em termos de Demanda de Energia Primária (PED) Cenário II – Cargas Inerentes – tratamento de multifuncionalidades por alocação mássica

Método Alocação Mássica									
Categoria de Impacto	Unit	Total	Produção e Transporte de Eletricidade	Produção e Transporte de Gás Natural	Produção e Transporte de O_2	Produção e Transporte de N_2	Captação e Transporte de Água	Produção Diesel	Disposição de Rejeitos
NRF	MJ	7,96E-01	9,96E-02	5,77E-01	5,51E-02	2,62E-02	1,19E-02	1,67E-02	9,48E-03
NRN	MJ	7,31E-02	3,66E-02	2,79E-05	2,03E-02	9,62E-03	4,36E-03	2,39E-05	2,16E-03
NRB	MJ	1,12E-08	4,71E-09	5,68E-10	2,60E-09	1,24E-09	5,60E-10	1,12E-10	1,39E-09
RB	MJ	2,06E-02	1,06E-02	9,99E-06	5,89E-03	2,79E-03	1,27E-03	6,12E-06	2,13E-05
RWSG	MJ	5,76E-03	2,97E-03	1,94E-06	1,64E-03	7,80E-04	3,53E-04	1,74E-06	7,45E-06
RW	MJ	4,81E-01	2,48E-01	2,11E-04	1,37E-01	6,51E-02	2,95E-02	1,41E-04	5,37E-04
Total	MJ	1,38	3,98E-01	5,77E-01	2,20E-01	1,04E-01	4,73E-02	1,69E-02	1,22E-02

9.2.3.2 Impactos Ambientais Decorrentes das Emissões – Cenário II

Assim como pode ser visto na Figura 26 o Cenário II proporciona reduções mínimas em termos de CC, TA, WD e MD sobre as etapas inerentes à obtenção de aço líquido. Além disso, e como já fora apontado antes, o desempenho da opção quanto a POF é pior que o cenário de referência. As participações de cada etapa da cadeia de produção do aço nessas categorias estão descritas na Figura 28. O processo propriamente dito de manufatura do aço domina as contribuições para CC (98 %), TA (84 %) e POF (90 %). Como já era de se supor, WD computa 98 % de aportes na forma de captação de água e MD é fortemente influenciado pela disposição de rejeitos.

Figura 28 - Perfil de impacto ambiental decorrentes de emissões inerentes a produção de 1,0 kg de aço líquido – Cenário II



As alterações propostas por este cenário reduzem em 2,63 gCO_{2eq}/ kg aço os impactos de CC do cenário de referência se os coprodutos foram tratados pelo *Surplus Method*. O decréscimo será de 1,76 g CO_{2eq}/ kg aço para uma modelagem por alocação mássica. O CO_2 aporta a quase totalidade das contribuições para a categoria (96 %), seguido, ainda que muito de longe por N_2O (4,0 %). Assim como já ocorrera com o Cenário I, a diminuição de impactos na forma de CC está atrelada à queima de combustíveis fósseis para produção de termoeletricidade na matriz nacional. Tanto é assim que a etapa emite 17,4 g CO_2 /kg aço (*Surplus Method*; ou 11,6 g/kg – alocação mássica) além de 940 µg N_2O/kg (*Surplus Method*; ou 630µg/kg – alocação mássica).

Já no que se refere a TA houve redução de 2,9 % aos e comparar o desempenho do Cenário II com o diagnóstico inicial. A geração de eletricidade via matriz nacional detém 10 % do total de impacto desta categoria, impulsionados principalmente por emissões de SO_x e NO_x originadas das combustões de óleo pesado (37 %), carvão (31 %), bagaço-de-cana (22 %) e gás natural (11 %). Na manufatura do aço há larga predominância de emissões de SO_x por conta de queima de combustíveis. Já as perdas de NO_x procedem da geração termoelétrica do grid brasileiro por conta de combustão de gás natutal (11 mg/kg), carvão (8,3mg/kg aço), óleo pesado (6,8 mg/kg), e bagaço de cana-de-açúcar (3,7mg/kg).

As emanações de NO_x são responsáveis por 53 % do total de impactos de POF. A elas se seguem liberações de CO (35 %) e NMVOC (7,6 %). O aumento originado por Cenário II em relação ao diagnóstico inicial se deve a um acréscimo de aproximadamente nove vezes nas emissões de CO proporcionadas pelo CDQ sobre as etapas inerentes ao processamento de aço, em virtude do sistema de queima e alívio de gases que está associado a essa tecnologia de apagamento. O gás drenado para a atmosfera pode conter de 14 a 28 % de CO dependendo do ponto em que ocorre o alívio assim como aparece destacado na Tabela 14.

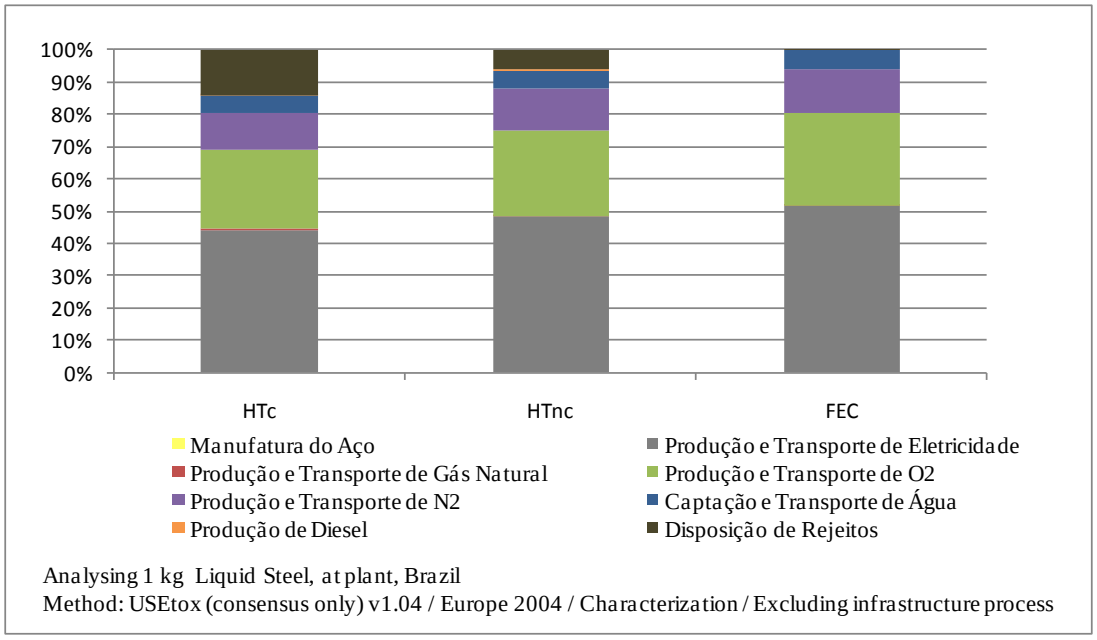
A expectativa de uma diminuição expressiva de consumo de água de processo em consequência da adoção do CDQ não se confirmou. Aliás, os resultados obtidos desaconselham a implantação dessa tecnologia como medida de economia hídrica. Se no diagnóstico inicial registrou-se um consumo de 35,9 L/kg a partir do enfoque dado pelo *Surplus Method*, a efetivação do CDQ reduziria a mesma demanda para apenas 35,7 L/kg. Adotando-se a abordagem de alocação por massa o decréscimo mostrou-se ainda menor: os 24,0 L/kg acumulados no diagnóstico inicial se converteriam em 23,9 L/kg com o Cenário II. De qualquer forma, a eliminação da captação de água referente ao apagamento do coque é responsável por 46 % da redução apresentada; o restante procede da produção eletricidade, devido à reposição de água por conta de purgas em caldeiras, evaporação em torres de resfriamento de unidades termelétricas e nucleares, e de umidade presente no carvão e no óleo pesado.

Não foi constatada influência significativa do Cenário II sobre impactos de MD para as etapas inerentes ao processo. Nesse caso, os decréscimos que foram registrados se deveram de maneira geral à diminuição de influência da energia advinda da rede concessionária sobre o processo.

Em termos de toxicidade, a opção pelo Cenário II também sugere decréscimo de impactos em comparação ao desempenho do diagnóstico inicial. Estes seriam de 20 % em termos de HTc, 22 % para HT_{NC}, e 23 % em relação a FEC (Figura 26).

A geração de eletricidade do grid Brasil desponta mais uma vez como principal fonte desses efeitos com participações que variam entre 44 e 51 % para essas categorias. O processamento de O_2 aparece em seguida com contribuições entre 24 e 29 % (Figura 29). Cabe destacar, porém, que nesse caso uma parcela substancial dos impactos atribuídos a produção de oxigênio decorre exatamente do consumo de eletricidade.

Figura 29 - Perfil de impacto ambiental de cargas inerentes para a produção de 1 kg de aço líquido em termos de toxicidade – Cenário II.



No que se refere a HT_C os precursores mais importantes são emissões de CH_2O procedentes da queima de óleo pesado (60 % das emanações dessa substância), e de perdas aéreas de C_6H_6 e TCDD, as quais ocorrem respectivamente em 60 % e 17 % a partir de queima de bagaço de cana. Quando observados sob a ótica do *Surplus Method* os lançamentos, em termos específicos, de CH_2O, TCDD e C_6H_6 totalizam respectivamente 40 µg/kg, 5,3 pg/kg e 50 µg/kg. Por outro lado, se a repartição de cargas ambientais ocorresse por alocação mássica esses resultados seriam de 30 µg/kg, 3,6 pg/kg e 40 µg/kg.

Mesmo no Cenário II os precursores de HT_{NC} permanecem sendo acetaldeído, $C_6H_5CH_3$ e CFC-10. A queima de óleo pesado para produção de energia termoelétrica contribui nesses casos com 8,0 µg acetaldeído/kg aço (*Surplus Method*; ou 5,0 µg/kg: alocação mássica), valor

que representa 70 % do total dessa emissão. A queima de bagaço participa com 39 % do total de emissões de $C_6H_5CH_3$ (22 µg/kg: *Surplus Method*; 15 µg/kg: alocação mássica), além de 85 % dos lançamentos de CFC-10 (9,0 ng/kg: *Surplus Method*; 6,0 ng/kg: alocação mássica).

Por fim, os impactos como FEC também advêm de emissões do bagaço: ametrina (600 µg/kg aço: *Surplus Method*; e 400 µg/kg: alocação mássica), diuron (560 µg/kg: *Surplus Method*; e 370 µg/kg: alocação mássica), e clomazone (440 µg/kg: *Surplus Method*; e 290 µg/kg: alocação mássica). Todas essas perdas para o ambiente ocorrem a partir do arraste de pesticidas usados no cultivo de cana-de-açúcar, cujo bagaço é exatamente queimado para geração de eletricidade.

9.3 Cenário III – Fonte Alternativa de Minério de Manganês

9.3.1 Definição de Objetivo e Escopo

Assim como já ocorrera com a comparação envolvendo o Cenário II esta etapa da análise segue os preceitos da norma ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2009) de enfoque atribucional e para escopo de aplicação do ‘berço-ao-portão’.

Nesses termos, a avaliação seguiu os mesmos princípios estabelecidos para aquela que a precedeu em termos de estabelecimento do Fluxo de Referência, Critérios de Exclusão, Tratamento de Multifuncionalidades, e Métodos de AICV e categorias de impacto. Tais ditames coadunam também com as bases outrora estabelecidas para formulação do diagnóstico inicial do processo, sendo conduzidos dessa forma a permitir comparações com aquela referência.

Quanto às particularizações realizadas nesse caso, cabe destacar que para efeito de Definição de Objetivo este momento do estudo busca identificar se a substituição da fonte de suprimento atual de minério de manganês por sucedâneo de outra procedência se reverte, de fato, em ganhos ambientais e energéticos.

Quanto ao *Tipo de dados* foram utilizados dados primários para expressar consumos e emissões de matéria e energia do processo de produção de aço. As características e condicionantes desse processo estão descritas na seção 5.1. A modelagem da variante que foi introduzida por este cenário baseou-se também em dados primários, baseando-se na abordagem tecnológica do conteúdo descrito na seção 8.3. Por outro lado, aspectos referentes à *Qualidade dos Dados* mantiveram o padrão de rigor aplicado aos demais cenários.

A Figura 30 que aparece a seguir descreve em detalhes as características do sistema de produto para o qual a modificação gerada pelo Cenário III já foi implementada.

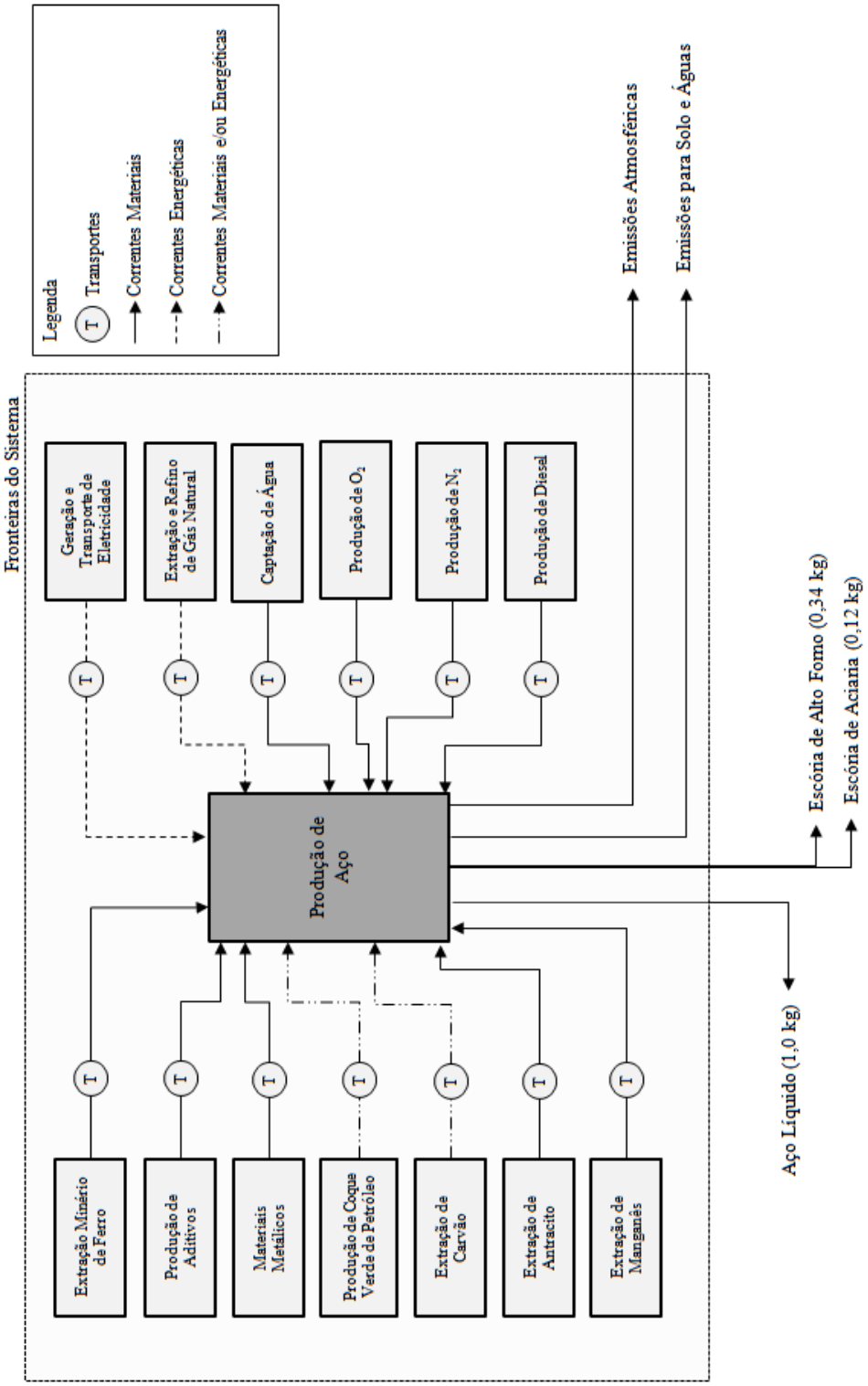


Figura 30 - Sistema de Produto e respectivas fronteiras – Cenário III

9.3.2 Inventário de Ciclo de Vida – Cenário III

O inventário descrito pela Tabela 28 compara consumos e emissões associadas à produção de 1,0 kg de aço líquido obtidos, respectivamente, no Diagnóstico Inicial e no Cenário III.

Tabela 28 - Inventário simplificado da produção de 1,0 kg de aço líquido – Diagnóstico Inicial vs. Cenário III.

Produto		
Aço líquido (kg)	1,00	1,00
	Diagnóstico Inicial	Cenário III
Entradas Materiais		
Minério de Ferro (kg)	1,47	1,52
Carvão mineral e CVP (kg)	6,80E-01	6,70E-01
Antracito (kg)	4,90E-02	4,90E-02
Minério de Manganês (Mn) (kg)	4,70E-02	1,00E-02
Materiais e aparas metálicas (kg)	1,10E-02	1,10E-02
Aditivos de processo (kg)	3,50E-01	3,30E-01
Oxigênio líquido ($O_{2(l)}$) (kg)	4,40E-02	4,40E-02
Nitrogênio líquido ($N_{2(l)}$) (kg)	3,90E-02	3,90E-02
Água de processo (L)	35,83	35,83
Óleo Diesel (L)	6,00E-04	6,00E-04
Instalações e equipamentos (P)	1,33E-11	1,33E-11
Entradas Energéticas		
Gás Natural (MJ)	7,70E-01	7,70E-01
Eletricidade (kWh)	1,90E-01	1,90E-01
Saídas		
Emissões para o Ar		
Dióxido de carbono (CO_2) (fóssil) (kg)	1,25	1,25
Monóxido de carbono (CO) (fóssil) (kg)	6,00E-04	6,00E-04
Energia residual (calor) (MJ)	9,69E-01	9,69E-01
Óxidos de Nitrogênio (expresso como NOx) (kg)	3,30E-04	3,30E-04
Óxidos de Enxofre (expresso como SOx) (kg)	3,00E-04	3,00E-04
Compostos Orgânicos Voláteis (kg)	3,00E-05	3,00E-05
Material particulado, $\varphi < 2.5$ µm (kg)	2,20E-04	2,20E-04
Monóxido de Nitrogênio (kg)	1,79E-04	1,79E-04
Rejeitos para tratamento		
Restos metálicos de processo - aterro sanitário (kg)	1,18E-02	1,18E-02

9.3.3 Resultados e Discussão – Cenário III

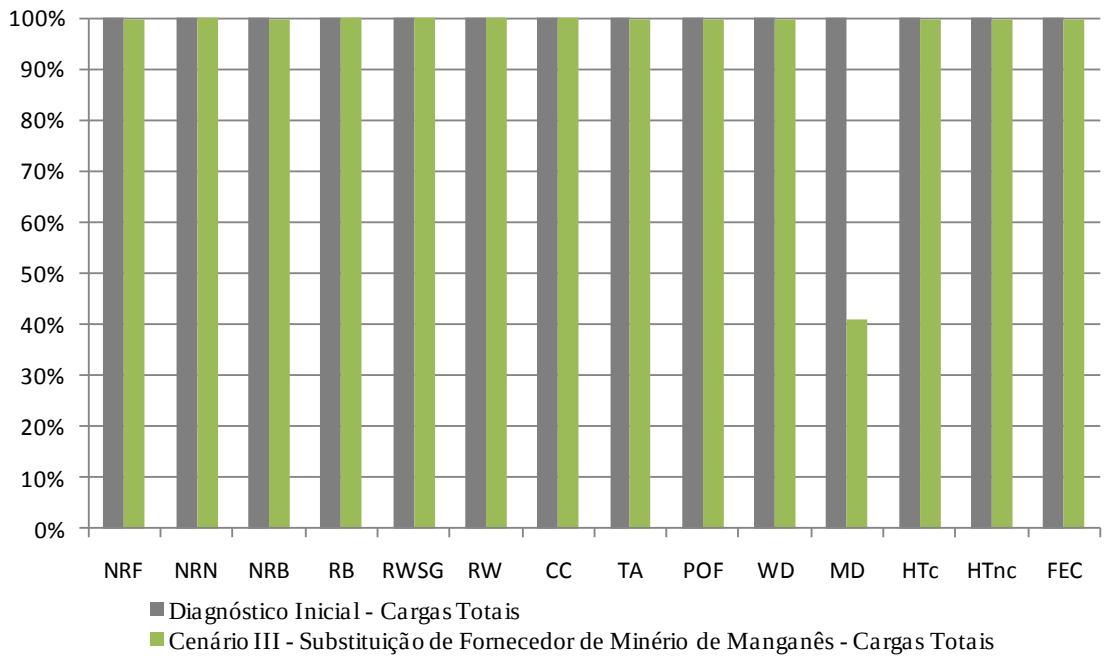
A Tabela 29 compara os resultados dos impactos ambientais de cargas totais proporcionados pela modificação de processo decorrentes do Cenário III com os observados na situação original de processo, os quais passam também a ser referidos como 'Impactos: Diagnóstico Inicial'.

Tabela 29 - Perfil de Impactos Ambientais da produção de 1,0 kg aço líquido do Cenário III para Cargas Totais – CED, ReCiPe Midpont (H) e USEtox.

Método de AICV	Categoria de impacto	Unidade	Impactos: Diagnóstico Inicial		Impactos: Cenário II	
			Surplus	Alocação Mássica	Surplus	Alocação Mássica
CED	NRF	MJ	25,63	17,15	25,51	17,07
	NRN	MJ	4,97E-01	3,33E-01	4,97E-01	3,32E-01
	NRB	MJ	4,63E-07	3,10E-07	4,61E-07	3,08E-07
	RB	MJ	5,55E-02	3,71E-02	5,52E-02	3,69E-02
	RWSG	MJ	1,82E-02	1,22E-02	1,82E-02	1,22E-02
	RW	MJ	1,05	7,0E-01	1,02	7,0E-01
	TOTAL	MJ	27,26	18,23	27,13	18,15
ReCiPe	CC	kg $CO_{2\ eq}$	1,56	1,04	1,55	1,04
	TA	kg $SO_{2\ eq}$	3,39E-03	2,27E-03	3,38E-03	2,26E-03
	POF	kg NMVOC	3,47E-03	2,32E-03	3,46E-3	2,31E-03
	WD	L	39,9	26,7	39,8	26,7
	MD	kg Fe_{eq}	2,88	1,93	1,18	7,90E-01
USEtox	HT_C	CTUh	4,04E-12	2,71E-12	4,04E-12	2,70E-12
	HT_{NC}	CTUh	1,63E-13	1,09E-13	1,62E-13	1,09E-13
	FEC	CTUe	8,56E-3	5,73E-03	8,55E-3	5,72E-03

Os resultados constantes da Tabela 29, bem como os impactos relativizados que aparecem na Figura 31 evidenciam que a alteração proposta pelo Cenário III apresenta, assim como suas homólogas, impactos pouco significativos sobre as categorias em análise. A exceção que, no entanto já era esperada, ocorre para MD cujo impacto mostrou ser 59 % menor do que aquele registrado para o diagnóstico inicial.

Figura 31 - Comparação de perfis ambientais da produção de Aço Líquido Cenário III vs Cenário Base – cargas totais do processo



Comparação 1 kg de Aço Líquido Produzido no Diagnóstico Inicial *versus* 1 kg de Aço Líquido produzido no Cenário I, ambos através do método Surplus e Alocação Mássica
Métodos de AICV: Cumulative Energy Demand v1.09 / Cumulative Energy Demand; Recipe Midpoint (H) v1.12 /Europe Recipe H; USEtox (consensus only) v1.04 / Europe 2004

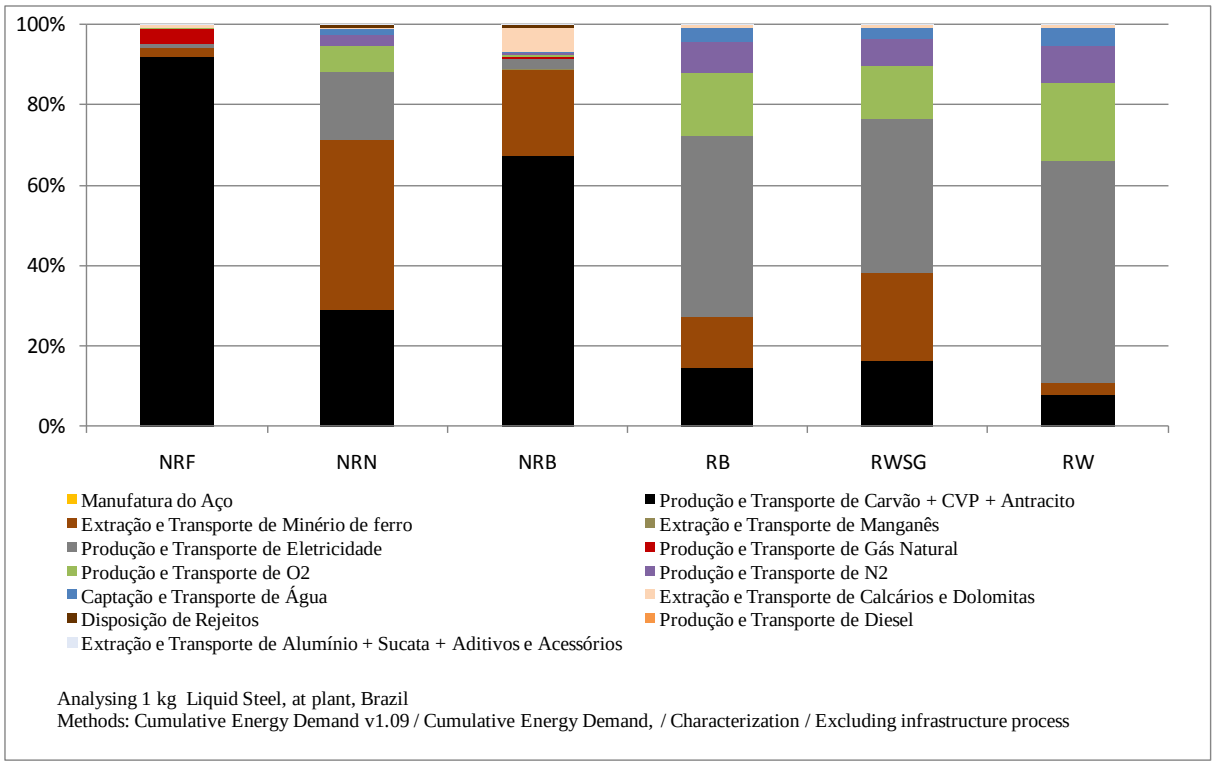
Ao contrário do que ocorreu com os Cenários I e II não será conduzida no caso presente, uma análise discretizada para as cargas inerentes à manufatura propriamente dita do aço, dado que a alteração aqui proposta se reverte exclusivamente sobre as etapas externas do processo.

9.3.3.1 Demanda Primária de Energia – Cenário III

Os perfis de impacto como PED entre o diagnóstico inicial e o Cenário III são semelhantes. Há apenas uma tênue redução no consumo energético total de Cenário III (0,16 MJ) com relação ao do caso base que resulta do acumulo de decréscimos individuais das diversas categorias de impacto (Figura 31). Tal como descreve a Figura 32 o PED para o Cenário III concentra-se nas etapas de 'Extração e Transporte de Materiais Carbonosos e Ferrosos', e 'Geração e Transporte de Eletricidade'. As operações vinculadas aos materiais carbonosos (Carvões Minerais, CVP e Antracito) compreendem 23,7 MJ/FR, ou 88 % do total de PED do sistema, quando a situação de multifuncionalidade a ele inerente for tratada pelo *Surplus Method*. Por outro lado, se a essa questão for dispensada uma abordagem baseada em alocação mássica, esta contribuição atinge o limite de 15,8 MJ/FR (Tabela 30). A ela se

seguem, ainda que á distância, a ‘Produção e Transporte de Eletricidade’ (3,5 %), ‘Extração e Transporte de Minério de Ferro (3,3 %) e, por fim, a ‘Produção e Transporte de Gás Natural’ (3,2 %).

Figura 32 Perfil de impacto ambiental em termos de PED para a produção de 1 kg aço – Cenário III.



A participação da categoria de impacto NRF mantem-se em 94 % do total de PED, assim como ocorre no diagnóstico inicial. Para o *Surplus Method* esse valor equivale a 25,5 MJ/FR, ao passo que para alocação mássica de 17,1 MJ/FR. Em termos de contribuição por estágios de processo, a categoria recebe cerca de 92 % dos aportes a partir da ‘Extração e Transporte de Materiais Carbonosos’, sendo 63 % dessa contribuição proveniente de operações ocorridas sobre o carvão mineral, 31 % via CVP, e os demais 6,0 %, por Antracito. A Extração e Transporte de Manganês corresponde a um consumo do total de energia de apenas 7,9 kJ/ kg de aço (*Surplus Method*; ou 5,3 kJ/kg: alocação mássica), que projeto um aporte relativo de 0,03 % do consumo total de energia.

Tabela 30 - Avaliação de desempenho energético da produção de aço líquido em termos de PED: Cenário III – Surplus Method e Alocação Mássica

Método Surplus																		
Categoria de Impacto	Unit	Total	Extração e Transporte de Carvão Mineral	Produção e Transporte de CVP	Extração e Transporte de Antracito	Produção e Transporte de Eletricidade	Extração e Transporte de Minério de Fe	Produção e Transporte de Gás Natural	Produção e Transporte de O2	Produção e Transporte de N2	Extração e Transporte de Calcários	Captação e Transporte de Água	Extração e Transporte de Dolomita	Produção Diesel	Disposição de Rejeitos	Extração e Transporte de Manganês	Extração e Transporte de Alumínio e Sucata	Transporte de Aditivos e Acessórios
NRF	MJ	25,51	14,79	7,35	1,31	2,33E-01	6,40E-01	8,62E-01	8,24E-02	3,91E-02	9,24E-02	1,79E-02	4,66E-02	2,49E-02	1,42E-02	7,39E-03	2,44E-03	6,23E-04
NRN	MJ	6,16E-01	1,07E-01	1,08E-02	2,54E-02	8,58E-02	2,11E-01	4,17E-05	3,03E-02	1,44E-02	8,17E-04	6,58E-03	1,52E-03	3,58E-05	3,23E-03	1,45E-04	6,06E-05	1,12E-05
NRB	MJ	7,37E-06	2,30E-07	5,66E-08	2,43E-08	1,10E-08	9,95E-08	8,87E-10	3,89E-09	1,85E-09	2,07E-08	8,45E-10	7,53E-09	1,67E-10	2,08E-09	1,62E-09	5,44E-10	2,65E-10
RB	MJ	8,04E-02	4,49E-03	2,69E-03	8,22E-04	2,49E-02	7,10E-03	2,37E-05	8,80E-03	4,17E-03	4,79E-05	1,91E-03	3,73E-04	9,15E-06	3,18E-05	1,83E-05	1,24E-05	3,20E-07
RWSG	MJ	1,54E-02	1,71E-03	7,66E-04	4,77E-04	6,96E-03	4,01E-03	2,90E-06	2,46E-03	1,17E-03	1,43E-05	5,33E-04	1,05E-04	2,60E-06	1,11E-05	4,80E-06	3,62E-06	1,46E-07
RW	MJ	6,42E-01	1,83E-02	6,17E-02	2,92E-03	5,81E-01	3,08E-02	3,15E-04	2,05E-01	9,73E-02	3,49E-04	4,45E-02	8,44E-03	2,10E-04	8,03E-04	3,12E-04	2,79E-04	1,65E-06
Total	MJ	26,86	14,93	7,43	1,33	9,32E-01	8,93E-01	8,62E-01	3,29E-01	1,56E-01	9,37E-02	7,14E-02	5,71E-02	2,52E-02	1,83E-02	7,87E-03	2,79E-03	6,37E-04

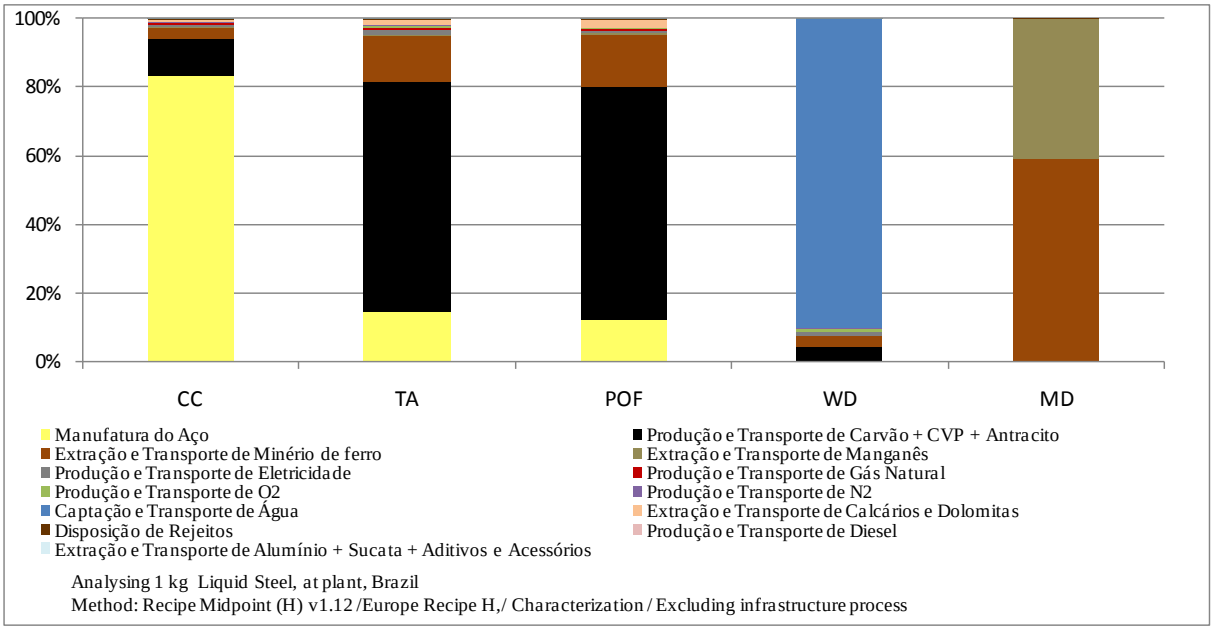
Alocação Mássica																		
Categoria de Impacto	Unit	Total	Extração e Transporte de Carvão Mineral	Produção e Transporte de CVP	Extração e Transporte de Antracito	Produção e Transporte de Eletricidade	Extração e Transporte de Minério de Fe	Produção e Transporte de Gás Natural	Produção e Transporte de O2	Produção e Transporte de N2	Extração e Transporte de Calcários	Captação e Transporte de Água	Extração e Transporte de Dolomita	Produção Diesel	Disposição de Rejeitos	Extração e Transporte de Manganês	Extração e Transporte de Alumínio e Sucata	Transporte de Aditivos e Acessórios
NRF	MJ	17,07	9,90	4,92	8,73E-01	1,56E-01	4,28E-01	5,77E-01	5,51E-02	2,61E-02	6,18E-02	1,20E-02	3,12E-02	1,67E-02	9,48E-03	4,95E-03	1,63E-03	4,17E-04
NRN	MJ	6,16E-01	7,14E-02	7,21E-03	1,70E-02	5,74E-02	1,41E-01	2,79E-05	2,03E-02	9,62E-03	5,46E-04	4,40E-03	1,02E-03	2,39E-05	2,16E-03	9,70E-05	4,05E-05	7,47E-06
NRB	MJ	7,37E-06	1,54E-07	3,79E-08	1,63E-08	7,38E-09	6,65E-08	5,93E-10	2,60E-09	1,24E-09	1,38E-08	5,66E-10	5,04E-09	1,12E-10	1,39E-09	1,08E-09	3,64E-10	1,78E-10
RB	MJ	8,04E-02	3,01E-03	1,80E-03	5,50E-04	1,67E-02	4,75E-03	1,58E-05	5,89E-03	2,79E-03	3,20E-05	1,28E-03	2,50E-04	6,12E-06	2,13E-05	1,22E-05	8,29E-06	2,14E-07
RWSG	MJ	1,54E-02	1,14E-03	5,13E-04	3,19E-04	4,65E-03	2,69E-03	1,94E-06	1,64E-03	7,80E-04	9,58E-06	3,57E-04	7,00E-05	1,74E-06	7,45E-06	3,21E-06	2,42E-06	9,80E-08
RW	MJ	6,42E-01	1,23E-02	4,12E-02	1,95E-03	3,89E-01	2,06E-02	2,11E-04	1,37E-01	6,51E-02	2,34E-04	2,98E-02	5,64E-03	1,41E-04	5,37E-04	2,09E-04	1,87E-04	1,11E-06
Total	MJ	18,42	9,99	4,97	8,93E-01	6,23E-01	5,97E-01	5,77E-01	2,20E-01	1,04E-01	6,27E-02	4,78E-02	3,82E-02	1,69E-02	1,22E-02	5,27E-03	1,87E-03	4,26E-04

9.3.3.2 Impactos Ambientais Decorrentes das Emissões – Cenário III

Também em termos de impactos decorrentes de emissões não foram observadas alterações expressivas de impactos associados a CC, TA, POF e WD (Figura 31). Observando-se o perfil de impacto por etapa de processo do diagnóstico inicial, descrito na Figura 10, era de se esperar que houvesse pouca alteração da ação que caracteriza o Cenário III sobre categorias, dado que cerca de 90 % das contribuições para tais efeitos advêm de extração e transporte de materiais carbonosos, ferrosos e de captação de água.

A expressiva mudança de perfil de impacto é observada na categoria de impacto Depleção de Metais. A participação da Extração e Transporte de Manganês passa a representar 41 % do total de impacto da categoria de Depleção de Metais. Em contrapartida a Extração e Transporte de Minério de Ferro eleva-se a 59 % (Figura 33).

Figura 33 - Perfil de impacto ambiental da produção de 1,0 kg de aço líquido – Cenário III.



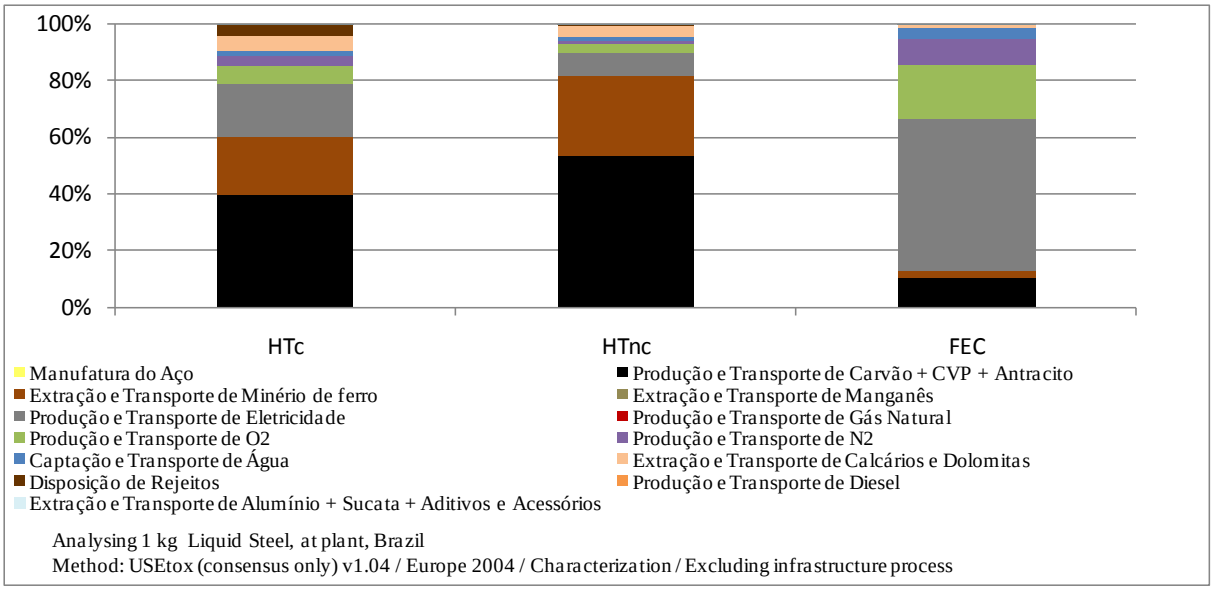
Quanto à categoria MD, percebem-se aumento no consumo de Fe (30 g/kg aço) em relação ao diagnóstico inicial, e redução de aproveitamento de Mn (23 g/kg). Esta alteração leva a redução de impacto de 1,70 kg Fe_{eq} /FR para *Surplus Method* (alocação mássica: 1,14 kg Fe_{eq}/FR).

Considerando os mesmos teores de Fe e Mn nos minerais usados para a análise do diagnóstico inicial (47 % e 61 %), e os consumos descritos no inventário (Tabela 28), projetam-se demanadas de Fe e Mn para o Cenário III, respectivamente de 710 e 6,10 g/kg aço

considerando-se *Surplus Method*. No caso de alocação mássica esses valores são retificados para 470 e 4,20 g/kg aço. Tendo em vista que os fatores de impacto (FI) do Ferro e do Manganês para a categoria de MD são respectivamente FI_{Fe} = 1,00 e FI_{Mn} = 76,6 as participações de cada qual desses metais para o referido efeito são de 710 e 467 g Fe_{eq}/kg (*Surplus Method*), e 470 e 322 g Fe_{eq}/kg (alocação mássica.

Ao comparar os perfis de impacto de toxicidade do diagnóstico inicial e do Cenário III, notou-se também não haver alterações significativas de desempenho. As reduções em termos de HTc, HTNC, e FEC (de 0,21 %, 0,20 % e 0,14 %) podem ser consideradas desprezíveis, inclusive para o nível de incerteza introduzido pelas modelagens de cada situação em análise.

Figura 34 - Perfil de impacto ambiental para produção de 1 kg de aço líquido em termos de toxicidade – Cenário III.



Tal como aparece na Figura 34, o Cenário III mostra contornos em termos de contribuições por etapas do processo semelhantes aos do diagnóstico inicial (Figura 12). Assim, da ordem de 90 % dos aportes remetem a extração e transporte de materiais carbonosos, ferrosos, a produção de N_2 e O_2, e a geração de eletricidade, as quais não são afetadas pelo fornecimento de Mn.

10. CONCLUSÕES FINAIS

Este estudo acadêmico-científico teve por objetivo realizar um diagnóstico do desempenho ambiental do processamento de aço líquido para condições praticadas no Brasil e, a partir dessa investigação, propor ações que resultem em melhoria potencial daquela performance.

O diagnóstico do desempenho ambiental do processo indicou que como etapas com maiores magnitude e recorrência de impactos: (i) Extração de Carvão Mineral, (ii) Processamento de Petróleo para Produção de CVP, (iii) Queima de combustíveis para transportes marítimo, rodoviário e ferroviário e (iv) Queima de combustíveis no mix de produção de energia elétrica. Outras etapas destacam-se pela especificidade, influenciando em categorias de impacto peculiares. São elas: (v) Extração e Transporte de Manganês e (vi) Captação e Transporte de Água. As etapas (i), (ii) e (iii) geram impactos externos à manufatura de aço em si.

Ao se considerar a expectativa da organização fornecedora de dados para o estudo, decidiu-se concentrar esforços em problemas que estivessem sob sua intervenção direta. Sob a luz dessa abordagem prevalesceram como focos de impactos ambientais: (i) Produção de Energia Elétrica do Grid Nacional, (ii) Captação e Distribuição de Água, e (iii) Manufatura do Aço propriamente dita.

A partir disso foram definidos, especificados e dimensionados três cenários de solução. Com o Cenário I, que consistiu no reaproveitamento do gás de processo de Aciaria, foram identificadas melhorias relevantes no desempenho ambiental em termos de Demanda Primária de Energia (PED) e Toxicidade, em todas as categorias de impacto analisadas: NRF, NRN, NRB, RB, RWSG, RW, HT_c, HT_{NC} e FEC). Por outro lado, pouca variação foi observada em termos de impactos como emissões. A etapa de geração e Transporte de energia destaca-se na intensidade dos impactos apresentado, sendo a responsável pela magnitude da melhoria. A proposta apresentada reduziu a dependência de energia elétrica do Grid nacional e dessa forma, impactos relacionados a essa etapa de processo foram reduzidas nas categorias apresentadas.

O Cenário II contou com a implantação de tecnologia para apagamento a seco do coque bruto (CDQ). Este cenário apresentou perfil ambiental muito semelhante ao descrito para o Cenário I, visto que também reduz a dependência de eletricidade do grid nacional. Melhorias também foram observadas nas categorias de impacto NRF, NRN, NRB, RB, RWSG, RW, HT_c, HT_{NC}

e FEC de PED e Toxicidade. Reduzido impacto foi visto em termos de emissões, nas formas de CC, TA, WD e MD. Entretanto, houve uma piora de desempenho ambiental em termos POF. Isso aconteceu, pois o Cenário II apresentou aumento das emissões de monóxido de carbono (CO), em função dos sistemas de alívio associados ao CDQ.

O Cenário III, que tratou da alteração do fornecedor de Minério de Manganês, divergiu das análises apresentadas para o Cenário I e II. Esta proposta apresentou melhoria significativa apenas na categoria de MD, um resultado que seria esperado de antemão. Para os demais efeitos, pouca oscilação de impactos foi observada.

Embora se tenha realizada ampla pesquisa, os cenários avaliados no estudo foram impedidos de serem comparados a dados recolhidos na literatura dada a especificidade do trabalho realizado.

A ACV cumpriu com os objetivos que se esperam de uma técnica de diagnóstico, de identificar focos potenciais de geração de impactos e de verificar efeitos decorrentes de ações potenciais de melhoria de desempenho. Espera-se que esse estudo possa atender às expectativas que motivaram sua realização, de introduzir a variável ambiental em processos gerenciais de tomada de decisão que ocorram no setor siderúrgico.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se, para o aprimoramento do trabalho, a substituição de dados secundários por dados primários, a citar: os estágios de extração e transporte de matérias-primas, utilidades de processo e óleo diesel, por exemplo. Além disso, propõe-se a avaliação do desempenho ambiental da sinergia entre os Cenários I e II do trabalho, cenários esses passíveis de associação.

O diagnóstico consistente da produção de aço líquido para uma condição tecnológica média do país do presente estudo também contribuiu ativamente com o levantamento de dados primários junto à indústria de grande porte do setor. Como o processo de inventariação das informações é exaustivo e demorado, o intercâmbio e disponibilização deste conhecimento através banco de dados regionais é um meio de simplificação para estudos futuros. O projeto de construção de bancos de dados de estudo de ACV é uma combinação de esforços, através da participação de grupos de trabalho regionais de diversos setores interessados: empresas, associações, universidade, governo e sociedade. O pilar empresa/universidade foi estabelecido na execução do presente trabalho e torna-se um impulsionador para a participação das demais áreas envolvidas para implementação e disponibilização de um banco consolidado de dados.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: Gestão Ambiental, Avaliação do Ciclo de Vida: requisitos e orientações. São Paulo: ABNT, 2009.

ACV BRASIL. Avaliação Social do Ciclo de Vida. Paraná: ACV Brasil, 2015. Disponível em: http://www.acvbrasil.com.br Acesso em: 19 de Ago. 2015

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. CDU: 621.31(81)(084.4) Brasília : ANEEL, 2008. 236p. ISBN: 978-85-87491-10-7

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Anuário Estatístico 2011. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: http://www.brasilcom.com.br Acesso em: 13 de Ago. 2015

ASIAN-PACIFIC PARTNERSHIP ON CLEAN DEVELOPMENT AND CLIMATE. **The State-of-the-Art Clean Technologies (SOACT) for Steelmaking Handbook, 2nd Ed.** United States: Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate, 2010.

BARÃO, C. D. *et al*. **Avaliação do Minério de Manganês em Aciaria a Oxigênio. Tecnologia em Metalurgia e Materiais**. São Paulo, v.4, n.2, p. 45-49, out.-dez., 2007. doi: 10.4322/tmm.00402009

BAUMANN H.; TILLMAN A. M.. **The hitch hiker's guide to LCA**. Suécia: Studentlitteratur AB, 2004.

BRAND, K.W. **Politik der Nachhaltigkeit**; Edition sigma: Berlin, Germany, 2002.

BRUNTLAND, G.H. **Our Common Future: The World Commission on Environment and Development**. Oxford University Press: Oxford, UK, 1987.

BURCHART-KOROL, D. **Life Cycle Assessment of Steel Production in Poland: a Case Study**. Journal of Cleaner Production 54 (2013) 235 – 243, 2013

CASTRO, J. A. **Modeling Sintering Process of Iron Ore, Sintering - Methods and Products**, Dr. Volodymyr Shatokha (Ed.), ISBN: 978-953-51-0371-4, InTech, doi: 10.5772/33613, 2012 Disponível em: http://www.intechopen.com/books/sintering-methods-and-products/modeling-sintering-process-of-iron-ore. Acesso em: 21 de Abr de 2015.

CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO EM AÇO. Estatísticas. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Construção em Aço, 2015. Disponível em: http://www.cbca-acobrasil.org.br. Acesso em: 15 de Ago. 2015.

CHEN, B., YANG, J., OUYANG, Z. **Life Cycle Assessment of Internal Recycling Options of Steel Slag in Chinese Iron and Steel Industry**. Journal of Iron and Steel Research, International. 18(7): 33-40, 2011.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Água, Indústria e Sustentabilidade**. Brasília, 2013. Disponível em: http://arquivos.portaldaindustria.com.br Acesso em: 08 de Abr. de 2015.

COSTA, L. C. *et al*. **Processo de Fabricação do Coque**. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2013. Apostila como parte do curso de Carvão Aplicado à Fabricação de Coque de Alto Forno ministrada pelo profissional Luiz Cláudio Costa.

CRISTALE *et al*. **Influence of sugarcane burning on indoor/outdoor PAH air pollution in Brazil**. Environ. Pollut., 169 (2012), pp. 210 –216. doi:10.1016/j.envpol.2012.03.045

DONG *et al*. **Environmental and economic gains of industrial symbiosis for Chinese iron/steel industry: Kawasaki's experience and practice in Liuzhou and Jinan**. Journal of Cleaner Production 59 (2013) 226-238.

DONG *et al*. **Achieving carbon emission reduction through industrial & urban symbiosis: A case of Kawasaki**. Energy 64 (2014) 277-286.

EKVALL, T., FINNVEDEN, G. **Allocation in ISO 14041—a critical review**. Journal of Cleaner Production, 9 (2001), pp. 197-208

ERRERA, M. R., MILANEZ, L. F. **Thermodynamic Analysis of a Coke Dry Quenching Unit**. Energy Conversion & Management 41 (2000), PP. 109 – 127.

EYERER, P. **Ganzheitliche Bilanzierung—Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen**; Springer: Heidelberg, Switzerland, 1996.

FINKBEINER, M. *et al*.**Towards life cycle sustainability assessment**. Sustainability, 2 (2010), pp. 3309–3322.

FINKBEINER, M.; SAUR, K. **Ganzheitliche Bewertung in der Praxis**. In Ökologische Bewertung von Produkten, Betrieben und Branchen; Symposium Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie Österreich: Vienna, Austria, 1999.

FINNVEDEN, G., *et al*. **Recent developments in life cycle assessment**. Journal of Environmental Management, n. 91, p. 1-21, 2009.

FIRTH, A. R. e MANUEL, J. R. **Thermal Implications of Phase Transformations during Induration of Iron Ore Pellets Produced from Hematite**. ISIJ International, Vol. 45 (2005), nº 11, pp. 1561-1566.

FONSECA *et al*. **Investimentos na Indústria Brasileira – Perspectivas de Investimento 2010/2013**. Banco Nacional de Desenvolvimento, 2010. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/ Acesso em: 03 de Jun de 2015.

FRANÇA, A. L. F. **Minimização do consumo de água e da geração de efluentes líquidos em siderurgia**. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2012. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, 173p.

FRISCHKNECHT, R., *et al*. **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Data v2.0. Ecoinvent report No. 3**, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007. Disponível em: www.ecoinvent.ch

GANDRA, A. **Produção siderúrgica brasileira não terá crescimento este ano, diz instituto**. Empresa Brasil de Comunicação S/A. Novembro, 2014. Disponível em: http://agenciabrasil.ebc.com.br Acesso em 15 de Ago. 2015

GEERDS *et al*, 2009. **Modern Blast Furnace Ironmaking, an introduction**. Disponível em: http://books.google.com.br. Acesso em 21 de Abr de 2015.

GOEDKOOP, M *et al*. 2009. **ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level.** 1st Ed. Report I: Characterisation. Em: http://www.lcia-recipe.net.

GOEDKOOP, M., *et al*., 2013. **Description of the ReCiPe methodology for life assessment impact assessment**. ReCiPe Main Report Revised July 13th, 2012

GORLOV *et al*. **New Approaches to determination of energy consumption for de comminution processes**. Solid Fuel Chem. 43 (6), 391-399, 2009.

GUINÉE, J.B. *et al*. **Life Cycle Assessment: Past, Present an Future**. Environmental Science & Technology, v.45, n. 1, p. 90-96, 2011.

HAQUE N., NORGATE, T. **Estimation of Greenhouse Emissions from Ferroalloy Production Using Life Cycle Assessment with Particular Reference to Australia**. Journal of Cleaner Production 39 (2013) 220-230.

HASANBEIGI, A., LYNN, K. P., AIMEE, T. M. **The State–of-the-Art Clean Technologies (SOACT) for Steelmaking Handbook (2nd Edition)**. Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate, American Iron and Steel Institute Washington, DC, 2010.

HEIJUNGS, R., SUH, S., 2002. **The Computational structure of Life Cycle Assessment**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

HUIJBREGTS M, Van de Meent D (2010). **USEtoxTM User manual**. Em: http://www.usetox.org

INFOMET. **Aço: Processo de Fabricação. Processos de Aglomeração de Minérios: Sinterização e Pelotização**. Disponível em: http://www.infomet.com.br. Acesso em: 17 de Ago. 2015.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **Relatório de Sustentabilidade 2011**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: http://www.acobrasil.org.br Acesso em 14 de Jun. 2015

_____. **A indústria do aço no Brasil e no mundo**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: http://www.nucleoinox.org.br. Acesso em: 08 de Jun. 2015.

_____. **Relatório de Sustentabilidade 2015**. Rio de Janeiro, 2016a. Disponível em: http://www.acobrasil.org.br. Acesso em 08 de Jul. 2016.

_____. **Folder Aço e Economia**. Rio de Janeiro, 2016b. Disponível em: http://www.acobrasil.org.br Acesso em: 08 de Jul. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS (IBGE). Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/. Acesso em 08 de Jul. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Uma Visão Comentada sobre Minerais Estratégicos e Terras Raras**. Brasília, 2015: IBRAM. Disponível em: http://www.ibram.org.br. Acesso em: 15 de Ago. 2015

INTERNATIONAL MONETARY FUND. **World Economic Outlook Database, April 2015**. Disponível em: http://www.imf.org. Acesso 10 de Jun. 2015.

JASE WORLD, Japanese Smart Energy Products & Technologies. Disponível em: http://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies/pdf/iron_steel/S-03.pdf. Acesso em: 20 de Fev. de 2016.

JOHNSON, R. **Water Use in Industries of the Future: Steel Industry**. U.S. Department of Energy. Washington, DC (2003). Disponível em: https://www1.eere.energy.gov Acesso em: 23 de Ago de 2015.

JOULAZADEH, M. H., JOULAZADEH, F. **Slag, Value Added Steel Industry Byproducts. Archives of Metallurgy and Materials**. Vol: 5, issue 4 (2010). pg: 1137 – 1145. DOI: DOI: 10.2478/v10172-010-0017-1.

LAGE, C.S.C.C., 2014. **Análise de Ciclo de Vida comparação entre livros impressos e livros digitais**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente – Perfil Gestão e Sistemas Ambientais. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Dezembro, 2014. Disponível em: http://run.unl.pt Acesso em: 19 de Ago. 2015.

LIU, X., YUAN, Z. **Life Cyle Environmental Performance of By-Product Coke Production**. Journal of Cleaner Production 112 (2016), p. 1292-1301, 2016.

MASSAGIE, M. *et al*. **The Influence of Allocation on the Carbon Footprint of Electricity Production from Waste Gas, a Case Study for Blast Furnace Gas**. Energies 2013, 6, 1217-1232, 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS (EPE). Balanço energético Nacional 2013, ano base 2012 (CDU 620.9:553.04(81)). Brasília: Ministério de Minas e Energia 2013.

MONQUERO, P.A. *et al*. **Lixiviação de clomazone + ametryn, diuron + hexazinone e isoxaflutole em dois tipos de solo**. Planta daninha, 2008, vol.26, no.3, p.685-691. ISSN 0100-8358. http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582008000300025. Acesso em 05 de Junho de 2016.

MOYA, J. A., PARDO, N. **The potential for improvements in energy efficiency and CO2 emissions in the EU27 iron and steel industry under different payback periods**. Journal of Cleaner Production 52 (2013) 71-83.

MUGICA-ALVAREZ *et al*. **Emissions of PAHs derived from sugarcane burning and processing in Chiapas and Morelos México**. Science of the Total Environment 527 –528 (2015) 474–482. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.08

MUNIZ, V. C. **Análise da Fundamentação da Avaliação do Ciclo de Vida Consequencial**. São Paulo, 2012. 88p.

NAKAHIRA, E., MEDEIROS, G. A. **Rotulagem Ambiental: o caso do setor cosmético**. Trabalho final de graduação do curso de Gestão Empresarial apresentado na Faculdade de Tecnologia de Indaiatuba (FATEC-ID) do Centro de Ensino e Educação Tecnológica Paula Souza. Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 2, p. 544-563, mai/ago 2009. Disponível em: http://www.researchgate.net. Acesso em 19 de Ago. 2015.

NORGATE, T. *et al*. **Biomass as a Source of Renewable Carbon for Iron and Steelmaking**. ISIJ International, Vol. 52(8): 1472– 1481, 2012.

NORGATE, T., JAHANSHAHI, S. **Reducing the greenhouse gas footprint of primary metal production: Where should the focus be?**. Minerals and Engineering. 1563 – 1570, 2011.

OLIVEIRA, F. N., SOLLERO, L. P. F**. Consumo de Aço no Brasil: um modelo baseado na técnica da intensidade do uso.** Banco Central do Brasil. Brasília, 2014. Disponível em: http://www.bcb.gov.br. Acesso em 24/04/2015.

OYAMA, N. *et al*, 2010. **Development of Secondary-fuel Injection Technology for Energy Reduction in the Iron Ore Sintering Process**. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp Acesso em: 21 de Abr 2015.

OYAMA, N., *et al*. **Development of secondary-fuel injection technology for energy reduction in the iron ore sintering process**. ISIJ International, v. 51, n. 06, p. 913-921, Mar. 2011.

QUITES, E. E. C. *et al*., 2013. Redução de Minério de Ferro: Altos Fornos. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2013. Apostila como parte do curso de Siderurgia para não Siderurgistas ministrada pelo profissional Eduardo Emery Cunha Quites.

REDA, A. A. *et al*. **Gas phase carbonyl compounds in ship emissions: Differences between diesel fuel and heavy fuel oil operation**. Atmospheric Environment 112 (2015) 370 - 380.

RYMAN, C., LARSSON, M. **Reduction of CO2 Emission from Integrated Steelmaking by Optimised Scrap Strategies: Application of Process Integration Models on the BF-BOF System**. ISIJ International, Vol. 46 (2006), No 12, PP. 1752-1758.

RODRIGUES, P. W., SCHERDIEN, I. **Design estratégico na comunicação de sustentabilidadenas embalagens Natura Ekos**. Strategic Design Research Journal, 6(2): 58-63 May-August 2013©2013 by Unisinos – doi: 10.4013/sdrj.2013.62.02. Disponível em: http://revistas.unisinos.br. Acesso em: 19 de Ago. 2015.

SAADE, M.R.M. *et al*. **A Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, e a etapa de avaliação de impactos ambientais: considerações sobre o uso de diferentes métodos e seus reflexos nos resultados finais**. Natureza on-line 12 (3): 109-116, 2014.

SALMI, O., WIERINK, M. **Effects of Waste Recovery on Carbon Footprint: a case study of the Gulf of Bothnia Steel and Zinc Industries**. Journal of Cleaner Production 19 (2011) 1857 – 1864.

SAMPAIO, R. **Large-scale charcoal production to reduce CO2 emission and improve quality in the coal based ironmaking industry**. 2005. Disponível em: www.bioenergytrade.org. Acesso em: 21 de Abr de 2015.

SEO, E.S.M., KULAY, L. **Avaliação do Ciclo de Vida: Ferramenta Gerencial para Tomada de Decisão**. Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente - v.1, n.1, Art 4, ago 2006.

SOUPAJARVI, H., PONGRÁCZ, E., FABRITIUS, T. **The potential of using biomass-based reducing agents in the blast furnace: A review of thermochemical conversion technologies and assessments related to sustainability**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 25 (2013) 511 – 528.

SOUPAJARVI, H., PONGRÁCZ, E., FABRITIUS, T. Bioreducer **use in Finnish blast furnace ironmaking – Analysis of CO2 emission reduction potential and mitigation cost**. Applied Energy 124 (2014) 82 –93.

SUH, S. *et al*. **Generalized make and Use Framework for Allocation in Life Cycle Assessment**. J In Ecol 14 (2): 335-353 (2010) doi: 10.1111/j.1530-9290.2010.00235.x

TIAN, Y., ZHU, Q., GENG, Y. **An Analysis of Energy-Related Greenhouse Gas Emissions in the Chinese Iron and Steel Industry**. Energy Policy 56 (2013) 352 – 361.

TILLMAN, A. M. **Significance of decision-making for LCA methodology**. Environmental Impact Assessment Review, n.20, p. 113-123, 2000.

UNEP/SETAC. **Guidelines for Social Life Cycle Assessment of products**. United Nations Environment Programme, Paris, 2009.

UNEP-UNIDO**. United Nations Environment Program & United Nations Industrial Organization. Taking Stock and Moving Forward**. The UNIDO–UNEP National Cleaner Production Centres. Sustainable Production in Practice in Developing and Transition Countries. Joint UNIDO-UNEP Programme on Resource Efficient and Cleaner Production, 2010. Disponível em: < http://www.unep.org/resourceefficiency/Business/CleanerSaferProduction/ResourceEfficientCleanerProduction >. Acesso em: 07 set. 2016.

US ENERGY INFORMATION ADMISTRATION (EIA). **CO2 emission from Fuel Combustion**. Estados Unidos: US Energy Information Admisnistration, 2010. Disponível em: http://www.iea.org.gov. Acesso em: 03 de Mai. 2015.

_____. **International Energy Outlook 2013**. DOE/EIA 0484 (2013). Estados Unidos: US Energy Information Admisnistration, 2013. Disponível em: <http://www.eia.gov. Acesso em: 04 de Ago. 2014

VANDEBO, C. O., BOESCH, M. E., HELLWEG, S. **Life Cicle Assessment Model for de Use of Alternative Resources in Ironmaking.** Journal of Industrial Ecology. Volume 13 (2012), Number 3, 363-374.

VAN NESS, H. C., SMITH, J. M., ABBOTT, M. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**. LTC, 2007. Edição, pp. 626.

VIANA, O. A. **Estudo para o uso de matérias-primas nacionais em misturas de carvões para obtenção de coque com características requeridas em Altos Fornos de alta produtividade**. Dissertação (Mestrado em Metalurgia e Minas) Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Novembro, 2007.

WANG, C., RYMAN, C., DAHL, J. **Potential CO_2 Emission Reduction foi BF-BOF Steelmaking Based on Optimised Use of Ferrous Burden Materials**. International Journal of Greenhouse Gas Control 3 (2009), p. 29 – 38.

WORLDSTEEL ASSOCIATION. **Water Management in the Steel Industry, 2011**. Bélgica, 2011. Disponível em: <http://www.worldsteel.org Acesso em: 21 de Abr. 2015.

_____. **Sustainable Steel: At the Core of a Green Economy**. Bélgica, 2012. Disponível em: <http://www.worldsteel.org Acesso em: 27 de Jun. 2015.

_____. **Sustainable Steel: Policy and Indicators 2014**. Bélgica, 2014. Disponível em: <http://www.worldsteel.org Acesso em: 27 de Jun. 2015.

_____. **Worldsteel in Figures 2015**. Bélgica, 2015. Disponível em: http://www.worldsteel.org . Acesso em: 08 de Jun. 2015.

_____. **Worldsteel in Figures 2016**. Bélgica, 2016 Disponível em: http://www.worldsteel.org . Acesso em: 08 de Jul. 2016.

YELLISHETTY, M., MUDD, G. M., RANJITH, P. G. **The Steel Industry, Abiotic Resource Depletion and Life Cycle Assessment: a Real or Perceived Issue?** Journal of Cleaner Production. 78-90, 2011.

YIVE, N. S. C. K., Tiroumalechetty, M. **Dioxin levels in fly ash coming from the combustion of bagasse**. Journal of Hazardous Materials 155 (2008) 179 – 182. Doi:10.1016/j.jhazmat.2007.11.045.

XIE, J. *et al*. **Recycling of basic oxygen furnace slag in asphalt mixture: Material characterization & moisture damage investigation**. Construction & building materials, vol:36 (2012), pg:467 -474.

ZANGHELINI GM *et al*. **A bibliometric overview of Brazilian LCA research**. International Journal of Life Cycle Assessment. (2016) (on-line version) doi:10.1007/s11367-016-1132-7

ZHANG *et al*. **CO2 Emission Reduction within Chinese Iron & Steel Industry: Practices, Determinants ans Performance**. Journal of Cleaner Production 33 (2012) 167-178.

APÊNDICE

APÊNDICE A – EQUAÇÕES PARA FUNDAMENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE ALOCAÇÃO

$$\text{Fator de Alocação Mássica (Aço Líquido)} = \frac{\text{Massa AL}}{\text{Massa AL} + \text{Massa Escória AF} + \text{Massa Escória AC}} \quad (1)$$

$$\text{Fator de Alocação Mássica (Escória de Alto Forno)} = \frac{\text{Massa Escória AF}}{\text{Massa AL} + \text{Massa Escória AF} + \text{Massa Escória AC}} \quad (2)$$

$$\text{Fator de Alocação Mássica (Escória de Aciaria)} = \frac{\text{Massa Escória AC}}{\text{Massa AL} + \text{Massa Escória AF} + \text{Massa Escória AC}} \quad (3)$$

Onde: AL: Aço Líquido, AF: Alto Forno E AC: Aciaria

APÊNDICE B - EQUAÇÕES PARA FUNDAMENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE ECONÔMICA

Fator de Alocação Econômica (Aço Líquido)

$$= \frac{\text{Massa AL x Valor Unitário AL}}{\text{(Massa AL x valor unitário AL)} + \text{(Massa Escória AF x valor unitário Escória AF} + \text{(Massa Escória AC x valor unitário Escória AC)}} \quad (4)$$

Fator de Alocação Econômica (Escória de Alto Forno)

$$= \frac{\text{Massa Escória AF x Valor Unitário Escória AF}}{\text{(Massa AL x valor unitário AL)} + \text{(Massa Escória AF x valor unitário Escória AF} + \text{(Massa Escória AC x valor unitário Escória AC)}} \quad (5)$$

Fator de Alocação Econômica (Escória de Aciaria)

$$= \frac{\text{Massa Escória AC x Valor Unitário Escória AC}}{\text{(Massa AL x valor unitário AL)} + \text{(Massa Escória AF x valor unitário Escória AF)} + \text{(Massa Escória AC x valor unitário Escória AC)}} \quad (6)$$

Onde: AL: Aço Líquido, AF: Alto Forno E AC: Aciaria

APÊNDICE C – CÁLCULO DE CALORES ESPECÍFICOS

O cálculo de calor específico foi efetuado utilizando como base as premissas adotadas por Van Ness, Smith e Abbott para gases ideais. A equação 7 foi utilizada para determinação da temperatura de saída do gás da câmara de apagamento.

O Calor específico é dado por:

$$C_p\left(\frac{J}{mol.K}\right) = R.(a + b.T + c.T^2 + d.T^{-2}) \qquad (7)$$

Onde R é dado por 8,314 J/mol.K.

Os valores das constantes utilizadas para cada elemento trabalhado foram como Tabela 1.

Tabela 1: Constantes para determinação do calor específico.

Composto	**a**	**b**	**c**	**d**
CO	3,376	5,57E-04	0	-3.100
H_2	3,249	4,22E-04	0	8.300
CO_2	5,457	10,45E-04	0	-115.700
O_2	3,639	5,06E-04	0	-22.700
N_2	3,280	5,93E-04	0	4.000
H_2O	3,470	14,50E-04	0	12.100

Para determinação da temperatura de saída do gás da câmara de apagamento utilizam-se as equações 8 e 9.

$$H_{gás} = T_{saída\ apagamento} \cdot \begin{bmatrix} \left(c_p^{CO}.n°\ mols\ CO\right) + \left(c_p^{H_2}.n°\ mols\ H_2\right) + \left(c_p^{CO_2}.n°\ mols\ CO_2\right) + \\ \left(c_p^{O_2}.n°\ mols\ O_2\right) + \left(c_p^{N_2}.n°\ mols\ N_2\right) + \left(c_p^{H_2O}.n°\ mols\ H_2O\right) \end{bmatrix} \qquad (8)$$

$$H_{gás} + H_{disponibilizado\ pelo\ coque} = 0 \qquad (9)$$

Dessa forma, determina-se a temperatura de saída, uma vez que há disponível informações referentes a capacidade caloríficas e número de mols de cada elemento.