

LUCAS UNO PEREIRA

Versão Original

ANÁLISE MULTICRITERIAL DE TECNOLOGIAS SIDERÚRGICAS

Alternativas à mitigação de CO₂ na indústria siderúrgica

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo.

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme
Frederico Bernardo Lenz e Silva

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Pereira, Lucas

ANÁLISE MULTICRITERIAL DE TECNOLOGIAS SIDERÚRGICAS / L.

Pereira -- São Paulo, 2019.

64 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Análise multicriterial 2.tecnologias siderúrgicas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

*Ao meu filho Gabriel, que me dá
forças todos os dias para dar o próximo
passo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador Professor Dr. Guilherme Lenz pela ajuda, paciência, compreensão, ensinamentos e sabedoria na execução deste trabalho.

Agradeço também à minha família e minha namorada pelo contínuo apoio nos estudos e trabalho.

Por último, agradeço a Escola Politécnica pela estrutura fornecida para a execução do trabalho bem como a excelência nos meus aprendizados e preparos para a vida através de momentos desafiadores ali vividos.

“Tudo o que podemos decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado”.

(J. R. R. Tolkien, 2001, p. 53)

Resumo

Diante de uma época onde as questões ambientais vêm sendo cada vez mais relevantes, principalmente quanto às emissões de gases de efeito estufa (GEE), a necessidade de mudanças tecnológicas acaba se tornando mais do que necessária. No caso da indústria siderúrgica, que chega a corresponder quase um terço das emissões industriais totais de CO₂ (DE PAULA, 2012), esta necessidade de mudança requer ações ambiciosas em diversos setores. O presente estudo se concentra na análise das principais medidas que deveriam ser consideradas para tecnologias siderúrgicas presentes, e, potenciais processos que poderão entrar em escala comercial futuramente. Para isso, 2060 foi definido como ano base de análise e através de análises multicriteriais, doze critérios de cinco diferentes categorias (“tecnologia”, “sociedade e política”, “economia”, “segurança e vulnerabilidade” e “meio ambiente”) foram analisados para avaliar as futuras tecnologias siderúrgicas de uma maneira sistemática e holística no Brasil. As tecnologias em foco são as relacionadas ao alto-forno seguido de forno básico a oxigênio (BF-BOF), alto-forno com captura e armazenamento de carbono (BF-CCS) e redução direta de hidrogênio (H-DR). Cada tecnologia recebe uma nota em cada critério, no qual é ponderado ao final do cálculo dependendo do cenário analisado (padrão, siderúrgico, político ou ambiental). Para o ano alvo de 2060, o MCA aponta uma pontuação preferível para a tecnologia H-DR quando analisada nos cenários ambiental e padrão, enquanto a tecnologia BF-BOF é apontada como preferida nos cenários siderúrgico e político. Muito além da própria interpretação analítica da pontuação final diante dos critérios, a análise não mostra necessariamente uma sobreposição da tecnologia de redução por hidrogênio sobre o atual sistema siderúrgico implantado atualmente, mas uma tendência e orientação sobre a atual situação da siderurgia mundial e brasileira referente à descarbonização da indústria.

Palavras-chave: Siderurgia. Redução. Alto-forno. Hidrogênio. Carbono. Dióxido de carbono. Gás carbônico. Meio ambiente. Tecnologia. Segurança. Vulnerabilidade. Sociedade. Política. Análise multicriterial. Efeito estufa.

Abstract

Faced with a time when environmental issues are becoming increasingly relevant, especially regarding greenhouse gas (GHG) emissions, the need for technological change ends up becoming more than necessary. In the case of the steel industry, which accounts for almost a third of total industrial CO₂ emissions (DE PAULA, 2012), this need for change requires ambitious actions in several sectors. The present study focuses on the analysis of the main measures that should be considered for present steel technologies, and potential processes that may come to commercial scale in the future. For this, 2060 was defined as base year for analysis and through multicriterial analysis, twelve criteria from five different categories (“technology”, “society and politics”, “economy”, “security and vulnerability” and “environment”) were used to evaluate future steel technologies in a systematic and holistic manner in Brazil. The technologies in focus are those related to blast furnace followed by basic oxygen furnace (BF-BOF), carbon capture and storage blast furnace (BF-CCS) and direct hydrogen reduction (H-DR). Each technology receives a score in each criterion, which is weighted at the end of the calculation depending on the scenario analyzed (standard, steel, political or environmental). For the target year of 2060, MCA scores a preferable score for H-DR technology when analyzed in the environmental and standard scenarios, while BF-BOF technology is rated as preferred in the steel and political scenarios. Beyond the very analytical interpretation of the final score against the criteria, the analysis does not necessarily show an overlap of hydrogen reduction technology over the current steel system currently in place, but a trend and orientation about the current situation of the world and Brazilian steel industry regarding decarbonisation of industry.

Keywords: Steel industry. Reduction. Blast furnace. Hydrogen. Carbon. Carbon dioxide. Carbon dioxide. Environment. Technology. Safety. Vulnerability. Society. Politics. Multicriteria analysis. Greenhouse effect.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Concentração de CO ₂ no mundo ao longo do tempo, em toneladas métricas per capita	13
Figura 2 - Produção de Aço Bruto por País em 2018 (em milhões de toneladas). 20	
Figura 3 - Representatividade da Produção de Aço Bruto na América Latina em 2018	22
Figura 4 - Produção Anual de Aço Bruto no Brasil, em milhares de toneladas, e taxa de aumento da produção, em %	22
Figura 5 - Matriz Recíproca	24
Figura 6 - Matriz Recíproca com Auto Vetor (V).....	25
Figura 7 - Normalização do Auto Vetor (V)	25
Figura 8 - Exemplo de Cálculo da Nota Final pelo MCA	30
Figura 9 - Funcionamento de um alto forno	31
Figura 10 - Esquema de um forno básico a Oxigênio	32
Figura 11 - Esquema de opções de armazenagem geológica de CO ₂ em (1) formações salinas, (2) camadas profundas de carvão não mineráveis, (3) para uso melhorado de extração de petróleo ou (4) reservas esgotadas de petróleo e gás	33
Figura 12 - Esquema de Funcionamento do Processo Circored	35
Figura 13 - Distribuição das jazidas de carvão mineral por região	39
Figura 14 - Tempo estimado de esgotamento das jazidas de carvão mineral, por região	40
Figura 15 - Aceitação Social das Alternativas Analisadas.....	45
Figura 16 - Projeção de custo por tecnologia	47
Figura 17 - Consequências da catástrofe do Lago Nyos.....	50
Figura 18 - Gráfico de ponderação para o cenário padrão.....	54
Figura 19 - Gráfico de Ponderação para o cenário siderúrgico	54
Figura 20 - Gráfico de ponderação para o cenário político	55
Figura 21 - Gráfico de ponderação para o cenário ambiental	55
Figura 22 - Pontuação final de cada tecnologia, por tecnologia	58
Figura 23 - Pontuação final de cada tecnologia, por cenário	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de Aço Bruto por Empresa em 2018 (milhões de toneladas)	20
Tabela 2 - Tabela de Escala Fundamental.....	24
Tabela 3 - Índice Randômico.....	26
Tabela 4 - Critérios Analisados	29
Tabela 5 - Valores de Hierarquização dos Critérios para o Cenário Siderúrgico ..	36
Tabela 6 - Valores de Hierarquização dos Critérios para o Cenário Político.....	37
Tabela 7 - Valores de Hierarquização dos Critérios para o Cenário Ambiental	37
Tabela 8 - Valores de Verificação de Coerência da Hierarquização dos Critérios para cada Cenário	37
Tabela 9 - Resumo dos Resultados Obtidos Através do AHP.....	38
Tabela 10 - Avaliação de segurança de alternativas de fabricação de aço.....	50
Tabela 11 – Pontuação e Ponderação aplicadas no MCA	56
Tabela 12 - Ponderação das pontuações.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GEE	Gases de Efeito Estufa
MCA	Multicriteria Analysis
AHP	Analytic Hierarchy Process
BF-BOF	Rota via alto-forno e forno básico a oxigênio
BF-CCS	Rota via alto-forno com captura de carbono
H-DR	Rota via redução direta via hidrogênio
Ppm	Partes por milhão
FBMC	Fórum Brasileiro de Mudança do Clima
IPCC	Intergovernmental Panel for Climate Change
CO ₂	Dióxido de carbono
O ₂	Gás oxigênio
CO	Monóxido de carbono
H ₂	Gás hidrogênio
WSA	World Steel Association
Mt	Megatoneladas
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Dióxido de ferro III
ULCOS	Ultra Low CO ₂ Steelmaking
MW	Megawatt
GW	Gigawatt
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
HBI	Hot briquetted iron
MJ	Megajoule
GJ	Gigajoule

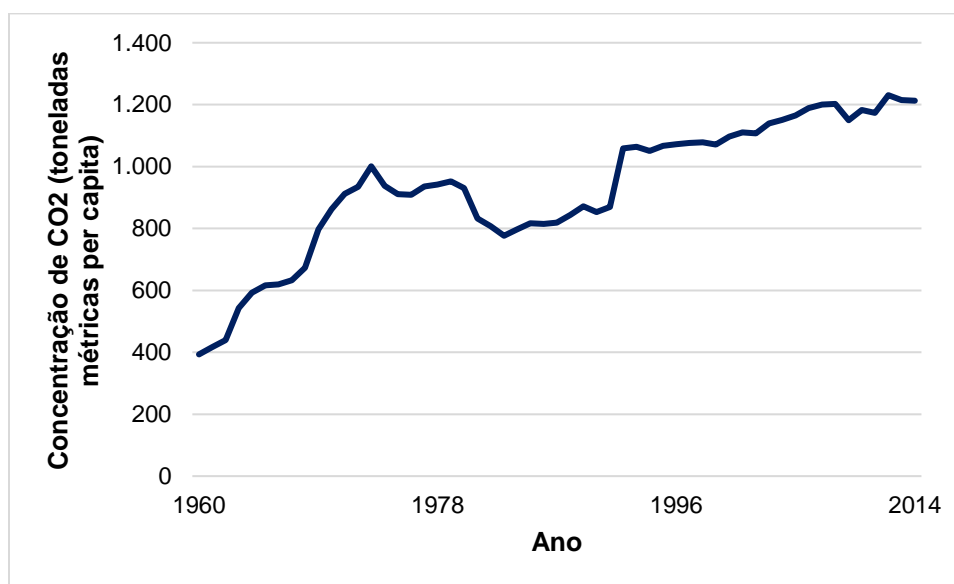
Sumário

1. Introdução	13
2. Revisão Bibliográfica.....	17
2.1. Decisão por Análise Multicriterial	17
2.2. A Indústria Siderúrgica Brasileira e Mundial.....	19
3. Materiais e Métodos.....	23
3.1. Processo Analítico de Hierarquização (AHP).....	23
3.2. Análise Multicriterial Simples.....	27
3.3. Tecnologias Siderúrgicas Analisadas.....	30
3.3.1. Redução por Alto Forno seguido de Forno Básico a Oxigênio (BF-BOF) 31	
3.3.2. Redução por Alto Forno com Captura e Armazenamento de Carbono (BF-CCS)	32
3.3.3. Redução Direta por Hidrogênio – Processo Circored (H-DR).....	33
4. Resultados e Discussões	36
4.1. Resultados do AHP	36
4.2. Pontuação dos Subcritérios para o MCA	38
4.2.1. Tecnologia	38
4.2.2. Sociedade & Política.....	43
4.2.3. Economia.....	46
4.2.4. Segurança e Vulnerabilidade.....	48
4.2.5. Meio Ambiente.....	51
4.3. Ponderação.....	53
4.4. Resumo dos Resultados	56
5. Conclusões	60
6. Referências Bibliográficas.....	63

1. Introdução

A mudança climática é um dos desafios cruciais para a humanidade. Desde a era pré-industrial, a emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera subiu constantemente, partindo de menos de 400 toneladas métricas per capita em 1960 para um novo recorde de mais de 1.200 toneladas métricas em 2014 (*International Energy Agency, 2014*). A drástica mitigação das mudanças climáticas é necessária em todo o mundo para atingir esse objetivo. Tal como sugerido pelo Fórum Brasileiro de Mudança do Clima (FBMC), o Brasil tem como meta zerar as emissões líquidas de GEE até 2060 (FBMC, 2018).

Figura 1 - Concentração de CO₂ no mundo ao longo do tempo, em toneladas métricas per capita



Fonte: International Energy Agency, 2014

Espera-se que a indústria de ferro e aço, uma das indústrias de maior consumo de energia e emissão de GEE no Brasil, contribua para as metas climáticas e reduza significativamente as emissões de GEE até 2060 (FBMC, 2018). A indústria siderúrgica atualmente representa cerca de 6,5% das emissões totais de CO₂ no mundo (DE PAULA, 2012), quase um terço das emissões industriais totais, que representam 20% das emissões mundiais de CO₂.

Atualmente, algumas das alternativas que têm sido utilizadas pelas empresas brasileiras para reduzir as emissões de GEE na siderurgia são: a cogeração de energia elétrica por meio do reaproveitamento de calor e de gases do processo; a substituição de insumos/ combustíveis; a otimização do controle de processos com automação; e os programas de sensibilização/treinamento de fornecedores (CARVALHO, 2015).

Pelo lado europeu, de acordo com as recomendações do *Intergovernmental Panel for Climate Change* (IPCC), e com o objetivo de manter a elevação da temperatura global abaixo de 2°C até 2050, o Conselho Europeu apoia o objetivo da União Europeia de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 80-95% até 2050 em comparação com os níveis de 1990, no contexto de reduções necessárias pelos países desenvolvidos como um grupo. O Parlamento Europeu também apoiou a necessidade de estabelecer uma meta de redução a longo prazo de pelo menos 80% até 2050 para a UE e os outros países desenvolvidos ao passo que o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS) emite um número decrescente de permissões de emissão equivalentes de dióxido de carbono (CO₂e¹) para a indústria, aumentando assimetricamente o custo de tecnologias intensivas em emissões.

O painel IPCC (IPCC, 2014: 24-26) identificou quatro principais opções de mitigação para redução de emissões de GEE na indústria siderúrgica: eficiência energética, eficiência de emissões, eficiência de materiais e eficiência de uso de produtos resultando na redução da demanda de produtos. Embora a demanda por produtos siderúrgicos em alguns países desenvolvidos possa atingir seu pico no atual século, a demanda mundial por aço deve aumentar, seguindo projeções atuais (Pauliuk et al., 2013: D). Uma mudança para a rota de produção secundária através da reciclagem tem um grande impacto na emissão de CO₂e. Embora ações maiores possam ser possíveis em longo prazo, devido ao material embutido, menos de 50% da demanda de aço pode ser coberta pela rota secundária até 2060 (Morfeldt et al.,

¹ CO₂e = medida que descreve o potencial de aquecimento global de qualquer mistura de emissões de GEE em CO₂ equivalente

2014: 1; Wörtler et al., 2013). Devido à otimização contínua, a indústria já está se aproximando do mínimo teórico de 1371 kg CO₂ e /t aço bruto (Kirschen et al., 2011: 6148) e pouco potencial adicional de eficiência energética ainda permanece nos atuais processos de produção. A pesquisa atual, portanto, concentra-se na eficiência de emissão por meio de tecnologias inovadoras de produção de aço primário.

Diversos projetos cujo foco está na diminuição da emissão de GEE na indústria siderúrgica estão sendo implementados atualmente:

- **HYBRIT:** Projeto localizado na Suécia, onde a siderúrgica SSAB, a mineradora LKAB e a empresa de energia Vattenfall formam a *joint venture* HYBRIT para explorar a viabilidade da produção de aço à base de hidrogênio, usando um projeto de processo de redução direta por hidrogênio. Atualmente em fase piloto, a primeira planta comercial é esperada para 2036 com um custo estimado de US\$ 147 milhões da planta piloto;
- **SALCOS:** colaboração entre a empresa Salzgitter AG e Fraunhofer Institute que visa implementar parcialmente a redução de minério de ferro à base de hidrogênio através da redução direta. O projeto visa aumentar gradativamente a quantidade de hidrogênio usado juntamente com o gás natural;
- **Siderwin e Boston Metal:** Siderwin é um projeto de pesquisa inicialmente fundado pela União Europeia e agora está sendo levado pela ArcelorMittal para a escala piloto. O processo consiste na utilização da eletrólise para produção de aço. Já a Boston Metal é uma *startup* americana que recentemente captou US\$ 20 milhões em sua última rodada de investimentos para o desenvolvimento do seu processo de eletrólise de óxido fundido;
- **Siderurgia via amônia:** Pesquisadores do Japão demonstraram uma redução de hematita através de amônia em escala laboratorial (Hosokai, 2011). Se aplicado em escala comercial, poderá ser mais uma alternativa à mitigação de CO₂ na siderurgia.
- **Hirsana:** Desenvolvido pela ULCOS (*Ultra-Low Carbon Dioxide Carbonmaking*), financiado pela União Europeia e vários grandes produtores

de aço, HIsarna é um processo de fase piloto para a produção de aço com potencial significativo de redução de emissões, especialmente se equipado com a tecnologia CCS. A tecnologia emprega um processo atualizado de redução por fundição que processa minério de ferro em uma única etapa, negando a necessidade de fornos de coque e processos de aglomeração. As plantas comerciais *greenfield* podem estar disponíveis dentro de 10 anos após a conclusão do atual projeto piloto;

- **COURSE 50:** iniciativa a partir de siderúrgicas japonesas e associações da indústria com o objetivo de utilizar uma proporção cada vez maior de hidrogênio na rota BF-BOF juntamente com captura de CO₂ através dos altos fornos. A iniciativa tem como objetivo entrar em escala comercial até 2030

A rota de produção primária convencional mais comum é baseada no alto-forno (BF) em combinação com o forno básico de oxigênio (BOF), que responde por mais de 70% da produção mundial de aço (World Steel Association, 2014: 10).

No presente trabalho, as seguintes tecnologias inovadoras de produção primária de aço, que são mais comumente discutidas como opções futuras na indústria e política tanto da Europa quanto de outros países desenvolvidos, foram avaliadas em comparação com a rota BF-BOF como referência:

- Alto-forno com forno de oxigênio básico equipado com CCS² (BF-CCS)
- Redução Direta por Hidrogênio (H-DR)

Este estudo visa utilizar análises multicriteriais mencionando as tecnologias de produção de aço primário para o ano de foco 2060. A pergunta de pesquisa a ser respondida é: **Qual tecnologia inovadora de produção primária de aço tem a maior preferência em diferentes cenários e critérios em 2060 no Brasil?**

Outros estudos baseados em análise multicriterial já foram utilizados na indústria siderúrgica (Fishedick, 2014) da mesma forma para se escolher uma alternativa tecnológica mais condizente com o cenário analisado na Alemanha. O uso de

² CCS = Carbon Capture Storage (Armazenamento de Captura de Carbono)

métodos de análise multicriterial são interessantes para estudos siderúrgicos devido a sua capacidade de analisar diversos fatores e critérios de diferentes setores de pesquisa uma vez que a própria indústria siderúrgica e toda sua infraestrutura e cadeia de produtos necessita de grande variedade de conhecimentos.

O ano de foco 2060 foi selecionado desde que o governo brasileiro se comprometeu a reduzir drasticamente as emissões de carbono a partir de 2060 (FBMC, 2018). O método selecionado, a análise multicriterial permite combinar uma variedade de diferentes critérios e perspectivas das partes interessadas em um processo de avaliação integral. Cada critério é cuidadosamente avaliado usando informações da literatura. Além de uma reflexão igual de cada critério, os critérios podem ser ponderados por fatores de ponderação específicos. Na pesquisa atual, três perspectivas exemplares das partes interessadas são simuladas com diferentes conjuntos de fatores de ponderação (ou seja, indústria siderúrgica, organização ambiental e governo). Assim, as rotas de produção de aço selecionadas podem ser comparadas de diferentes pontos de vista.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Decisão por Análise Multicriterial

A análise multicriterial, principal ferramenta utilizada neste estudo, consiste em um subgrupo estudado pela disciplina de “Pesquisa de Otimização”. É baseado na análise e ponderação de múltiplos critérios conflitantes para uma tomada de decisão. Esse método de analisar critérios e ponderá-los para uma tomada de decisão já foi até usado por Benjamin Franklin (1706 – 1790).

A análise multicriterial para uma tomada de decisão consiste em seguir passos simples para a utilização do método:

- 1) Definir um objetivo: o que se quer alcançar/decidir com a análise? Pode-se utilizar para analisar, por exemplo, melhor relação custo por diversos tipos de produtos;

- 2) Definir critérios: quais são os critérios a serem analisados? Durabilidade de um produto? Peso? Cor? Custo? Qualidade?
- 3) Ponderação dos critérios: Quais são os critérios mais importantes e qual sua ordem de importância? Pode-se considerar que o peso de um produto é o critério mais importante, ganhando 35% de ponderação, seguido de cor (20%), custo (15%), qualidade (15%), durabilidade (10%) e tipo de material (5%), por exemplo.
- 4) Ranquear as opções: este passo consiste em analisar suas opções com base nos critérios escolhidos e divulgar uma nota para cada opção, em uma variação a ser escolhida por quem analisa, podendo ser, por exemplo, uma nota entre 1 e 5, sendo 1 a nota em que o item analisado não tem boa relação com o critério analisado, e 5 em caso do item ter boa relação com o critério;
- 5) Cálculo: a nota de cada item analisado referente a um critério é multiplicada pela sua ponderação e somado com as outras notas ponderadas dos respectivos critérios. Ao final, cada item analisado possui uma nota global, em que a maior se consiste na melhor opção para o objetivo escolhido.

Na vida cotidiana do ser humano, geralmente avalia-se implicitamente vários critérios aos quais é possível sentir-se confortável com as consequências de tais decisões que são tomadas com base apenas na intuição. Por outro lado, quando o risco é considerado alto, é importante estruturar adequadamente o problema e avaliar explicitamente múltiplos critérios. Ao tomar a decisão de executar ou não uma obra, um estudo, uma ação, e onde executá-la, não são apenas questões muito complexas que envolvem múltiplos critérios, mas também há várias partes profundamente afetadas pelas consequências, por exemplo. A análise multicriterial permite uma tomada de decisão rápida e eficiente através de uma análise de diversos critérios de forma pouco profunda.

Atualmente existem diversos Métodos de Análise Multicriterial, cada um com sua particularidade e área de foco de estudo, como por exemplo:

- **Método de Randomização de Índices Agregados (AIRM):** utilizado na matemática aplicada, o AIRM é direcionado a objetos complexos sujeitos a

estimativas de multicritério sob incerteza. O AIRM foi desenvolvido pela primeira vez pelo matemático naval russo Aleksey Krylov por volta de 1908;

- **Análise de Envoltória de Dados (DEA):** método não paramétrico em pesquisa operacional e economia para a estimativa de fronteiras de produção. É usado para medir empiricamente a eficiência produtiva das unidades de decisão;
- **Value Engineering (EV):** método sistemático para melhorar o "valor" de bens ou produtos e serviços usando um exame de função. Pode ser considerada como uma técnica na qual o valor das saídas de um sistema é otimizado pela criação de uma combinação de desempenho (função) e custos. Na maioria dos casos, essa prática identifica e elimina gastos desnecessários, aumentando assim o valor para o fabricante e/ou seus clientes.

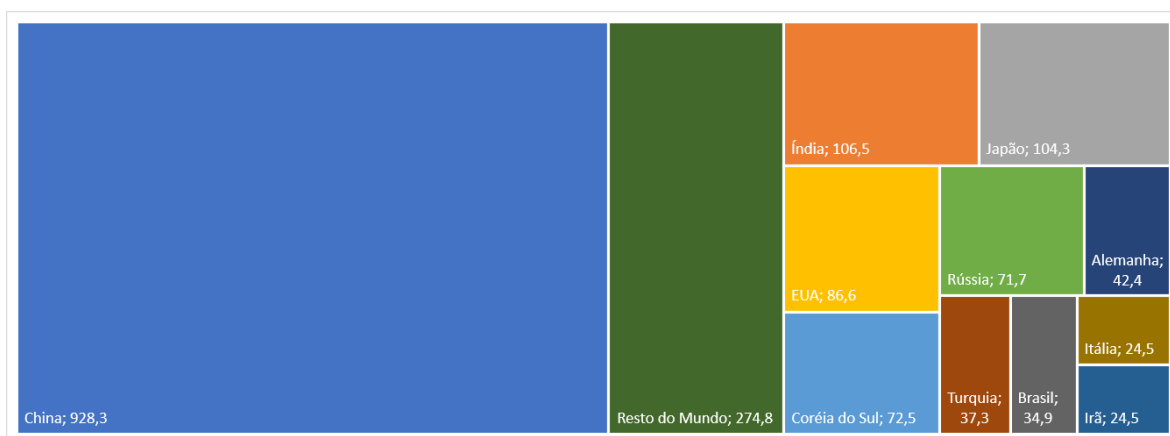
A decisão pelo uso da análise multicriterial se dá pelo fato de o trabalho em questão contemplar amplo leque de critérios analisados em diferentes cenários juntamente com uma necessidade de manuseio prático de grande quantidade de dados para uma tomada de decisão justa. A análise multicriterial permite analisar critérios de forma numérica para realizar interpretação analítica de critérios ou assuntos nem sempre analíticos.

2.2. A Indústria Siderúrgica Brasileira e Mundial

A produção mundial de aço bruto atingiu um novo recorde em 2018, produzindo mais de 1.785 Mt, 5,7% a mais do que o período anterior com grande destaque para a Ásia. A Ásia teve como um todo um crescimento de 3,6% na sua produção em relação ao período anterior, atingindo 1.164 Mt de aço bruto. Apenas a China teve uma representação de 71% nesse valor (World Steel Association, 2019).

O Brasil terminou 2018 em nono lugar em produção de aço bruto (World Steel Association, 2019) com uma produção de 34,7 Mt no período, ficando à frente de países como Itália, Irã, Taiwan e Ucrânia de acordo com a Figura 2.

Figura 2 - Produção de Aço Bruto por País em 2018 (em milhões de toneladas)



Fonte: World Steel Association, 2019

Mesmo assim, a participação do Brasil no volume produtivo corresponde só a 1,9% do total produzido mundialmente. Entre as maiores siderúrgicas do mundo, a AcelorMittal é a primeira no ranking em produção de aço bruto (96,4 milhões de toneladas), seguida por China Baowu Group e Nippon Steel Corporation de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1 - Produção de Aço Bruto por Empresa em 2018 (milhões de toneladas)

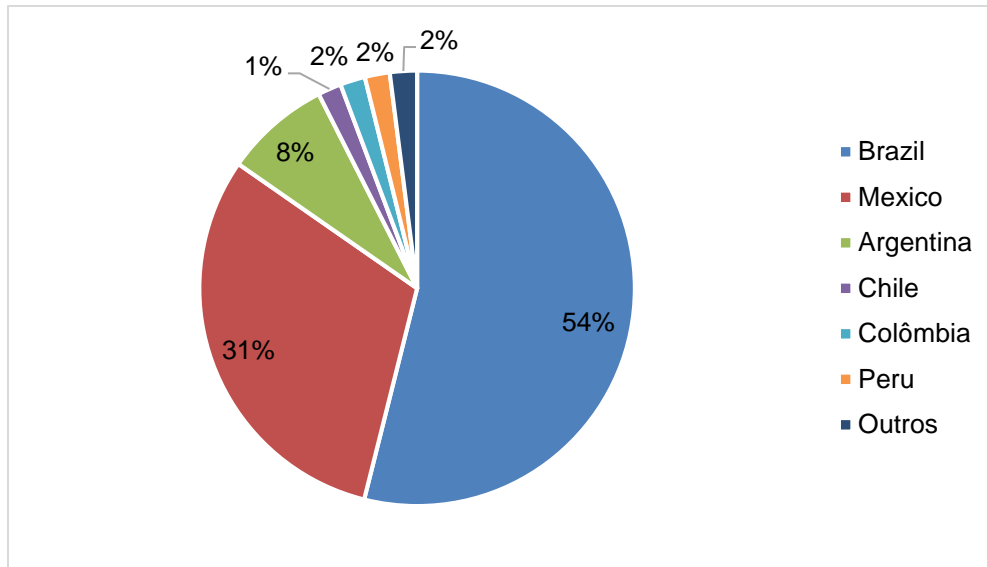
Posição	Empresa	Produção (milhões de toneladas)
1	ArcelorMittal	96,42
2	China Baowu Group	67,43
3	Nippon Steel Corporation	49,22
4	HBIS Group	46,8
5	POSCO	42,86
6	Shagang Group	40,66
7	Ansteel Group	37,36
8	JFE Steel Corporation	29,15
9	Jianlong Group	27,88

10	Shougang Group	27,34
11	Tata Steel Group	27,27
12	Nucor Corporation	25,49
13	Shandong Steel Group	23,21
14	Valin Group	23,01
15	Hyundai Steel Company	21,88
16	Maanshan Steel	19,64
17	Novolipetsk Steel (NLMK)	17,39
18	JSW Steel Limited	16,83
19	IMIDRO	16,79
20	Steel Authority of India Ltd. (SAIL)	15,93
21	Benxi Steel	15,9
22	China Steel Corporation	15,88
23	Gerdau S.A.	15,8
24	Fangda Steel	15,51
25	Techint Group	15,38

Fonte: World Steel Association, 2019

Apesar desta baixa representatividade mundial, o Brasil é líder na América Latina em produção de aço bruto, com mais de 50% da produção, de acordo com a Figura 3 (World Steel Association, 2019), seguido por México, com 30% e Argentina com 7,9%. No período, a América Latina produziu cerca de 65,1 Mt.

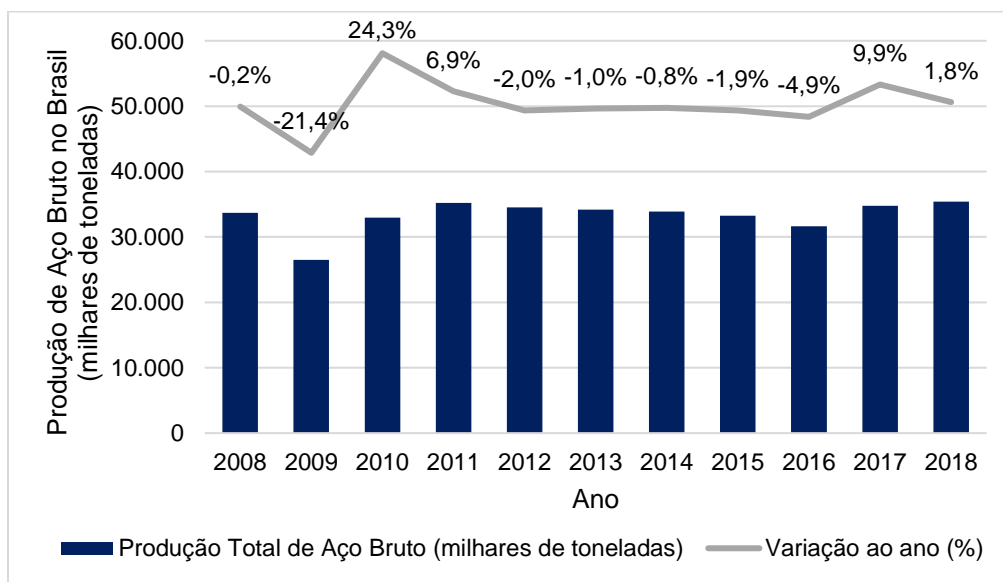
Figura 3 - Representatividade da Produção de Aço Bruto na América Latina em 2018



Fonte: World Steel Association, 2019

O parque industrial brasileiro é composto por 29 usinas operadas por 10 grupos empresariais (AVB, AcellorMittal, Aperam, CSP, Gerdau, Sinobras, Ternium Brasil, Usiminas, Vallourec e Villares Metals), empregando mais de 100.000 pessoas e com exportações para mais de 100 países (Instituto Aço Brasil).

Figura 4 - Produção Anual de Aço Bruto no Brasil, em milhares de toneladas, e taxa de aumento da produção, em %



Fonte: World Steel Association, 2019

Em 2017, o Brasil alcançou seu patamar atingido em 2012 em produção de aço bruto, crescendo quase 10% em relação ao ano anterior (World Steel Association) como pode ser observado na Figura 4.

3. Materiais e Métodos

Depois de introduzir a questão de pesquisa e uma breve revisão sobre o que rodeia o assunto em questão na seção anterior, esta seção tem como objetivo definir a metodologia utilizada para a análise. Os métodos utilizados foram o Processo Analítico de Hierarquização (*Analytical Hierarchy Process* – AHP) e a análise multicriterial simples, onde podem ser consultados nas seções 3.1 e 3.2.

3.1. Processo Analítico de Hierarquização (AHP)

Criado por Thomas Saaty na década de 1970 na Universidade da Pensilvânia, nos Estados Unidos, o AHP é um método utilizado para tomada de decisão considerando múltiplos critérios através de uma hierarquização prioritária utilizando análises quantitativos e qualitativos.

Neste método (Saaty, 1977), os julgamentos dos critérios qualitativos são feitos paritariamente, ou seja, dois a dois. Para realizar tal julgamento, Saaty criou uma escala fundamental onde a escala vai de 1 a 9 (Tabela 2) onde se compara cada critério com outro em uma matriz recíproca.

Tabela 2 - Tabela de Escala Fundamental

Valor	Definição	Explicação
1	igual importância	contribuição idêntica
3	fraca importância	juízo levemente superior
5	forte importância	juízo fortemente a favor
7	muito forte importância	dominância reconhecida
9	importância absoluta	dominância comprovada
2,4,6 e 8	Valores intermediários	Dúvida

Fonte: Saaty, 1977

Assim, é possível montar uma hierarquização dos critérios analisados com base nos valores representativos de cada critério através de um Auto Vetor (V), no qual cada coordenada é a média geométrica de cada linha da matriz recíproca.

Racional de Avaliação

Tomando como base três critérios C_1 , C_2 e C_3 , nos quais são julgados, subjetivamente ou analiticamente, de acordo como:

- C_2 é de muito forte importância comparado a C_1 ;
- C_2 é de forte importância comparado a C_3 e;
- C_3 é tanto de igual importância ou levemente importante comparado a C_1 .

Pode-se obter a seguinte matriz recíproca (Figura 5), na qual sua diagonal é composta obrigatoriamente por valores iguais a 1:

Figura 5 - Matriz Recíproca

	C_1	C_2	C_3
C_1	1	1/7	1/2
C_2	7	1	5
C_3	2	1/5	1

Para cálculo e definição da hierarquização dos critérios calcula-se a média geométrica dos componentes que compõem cada linha da matriz, ou seja:

$$V_1 = \sqrt[3]{1 \times 1/7 \times 1/2} = 0,41$$

$$V_2 = \sqrt[3]{7 \times 1 \times 5} = 3,27$$

$$V_3 = \sqrt[3]{2 \times 1/5 \times 1} = 0,74$$

Assim, obtêm-se o seguinte Auto Vetor V (Figura 6):

Figura 6 - Matriz Recíproca com Auto Vetor (V)

	C ₁	C ₂	C ₃	V
C ₁	1	1/7	1/2	0,41
C ₂	7	1	5	3,27
C ₃	2	1/5	1	0,74
Soma	10,00	1,34	6,50	4,42

Para a definição de hierarquização dos critérios, normaliza-se o Auto Vetor V, ou seja, calcula-se o valor relativos dos valores V₁, V₂, e V₃ à sua soma total:

Figura 7 - Normalização do Auto Vetor (V)

	C ₁	C ₂	C ₃	V	V-norm.
C ₁	1	1/7	1/2	0,41	9,4%
C ₂	7	1	5	3,27	74,0%
C ₃	2	1/5	1	0,74	16,7%
Soma	10,00	1,34	6,50	4,42	100,0%

Logo, a hierarquização dos critérios foi definida como o critério sendo C2 (74,0%) o mais importante, seguido do critério C3 (16,7%) e por último, C1 (9,4%).

Coerência dos julgamentos dos critérios:

O método AHP também permite verificar a coerência dos julgamentos de forma analítica (Saaty, 1977) através de uma Razão de Coerência (RC). De acordo com o método, se $RC < 10\%$, o julgamento é considerado coerente.

Para tanto, calcula-se um Autovalor (λ) resultante do produto escalar do Auto Vetor normalizado com o vetor de soma dos valores das colunas da matriz recíproca de acordo com a Equação 2:

$$(2) \quad \lambda = [10 \ 1,34 \ 6,50] \times [0,094 \ 0,74 \ 0,167] = 3,015$$

Com o Autovalor λ calculado, pode-se calcular o Índice de Coerência (IC) de acordo com a Equação 3:

$$(3) \quad IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{3,015 - 3}{3 - 1} = 0,0075$$

Onde n é a quantidade de critérios analisados.

Assim, pode-se calcular finalmente a Razão de Coerência (RC) de acordo com a Equação 4:

$$(4) \quad RC = \frac{IC}{IR}$$

Onde (IR) é o Índice Randômico, que é uma função de n que pode ser consultado na Tabela 3:

Tabela 3 - Índice Randômico

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Saaty, 1977

Logo,

$$(5) \quad RC = \frac{IC}{IR} = \frac{0,0075}{0,58} = 0,0129 = 1,29\% < 10\%$$

Portanto, pode-se concluir que os julgamentos estabelecidos entre os critérios C_1 , C_2 e C_3 são coerentes.

O método AHP no presente estudo é utilizado para classificar a importância de cada subcritério analisado em cada cenário. Os resultados do método AHP serão

utilizados para alimentar a análise multicriterial simples como ponderação de cada critério.

3.2. Análise Multicriterial Simples

Como forma de analisar qual seria a melhor (e ao mesmo tempo, dominante) tecnologia siderúrgica no futuro para o ano de foco 2060, critérios sócio-econômicos e ambientais foram considerados na análise. Assim, vários critérios das categorias “tecnologia”, “sociedade e política”, “economia”, “segurança e vulnerabilidade” e “meio ambiente” são incluídos na avaliação. Alguns dos critérios são quantitativos, outros são qualitativos, mas devem ser igualmente considerados no resultado da avaliação. Além disso, o método de avaliação deve satisfazer os seguintes requisitos, entre outros:

- Lidar com problemas complexos e multidimensionais
- Incluir perspectivas de avaliação de múltiplas partes interessadas
- Refletir problemas do mundo real com dados incompletos ou imprecisos
- Considerar a subjetividade das partes interessadas envolvidas

O método por análise multicriterial simples foi escolhido por ser um método capaz de lidar com grande quantidade de dados de acordo com uma nota dada a um determinado critério e a sua relevância em certo cenário

Um MCA geralmente começa com a definição explícita de alternativas que são avaliadas e comparadas entre si para identificar a melhor solução para um determinado problema. As alternativas na pesquisa atual são BF-BOF, BF-CCS e H-DR. Em um segundo momento, são identificados critérios que refletem as dimensões de avaliação relevantes (categorias) e, na prática, permitem uma diferenciação entre as alternativas em relação à questão de pesquisa. A avaliação dos critérios para todas as alternativas cria uma matriz que resume as diferenças entre as alternativas. Resumindo as avaliações para cada critério leva a um resultado em relação à preferência entre as alternativas consideradas. O uso de determinados fatores de ponderação (obtidos pelo método AHP anteriormente), ajuda a refletir as perspectivas e preferências específicas das partes interessadas. Em contraste com os métodos de otimização, no MCA não existe uma solução ótima

única, mas sim um ou até vários ajustes melhores. A consideração de diferentes perspectivas desempenha um papel importante e facilita a identificação de resultados robustos.

Começando pelos três pilares da sustentabilidade (social, econômico e ambiental) de acordo com *International Organization for Standardization* (ISO, 2013: 14) foram adicionadas as categorias tecnológica e de segurança, consideradas importantes para a avaliação das tecnologias siderúrgicas. Com base nesta seleção de critérios definida, 12 foram os subcritérios principais nas seguintes cinco categorias: tecnologia, sociedade e política, economia, segurança e vulnerabilidade e ecologia. Cada categoria reflete um sub-objetivo para o único objetivo principal do processo de MCA, ao passo que cada critério reflete parâmetros mensuráveis individuais relativos ao assunto em questão. Mesmo que um determinado critério possa se encaixar em várias categorias, cada critério é usado apenas uma vez, evitando a dupla ponderação de certos aspectos. O critério “dependência de recursos”; por exemplo, caberia nas categorias “economia”, “ecologia” ou como no catálogo de critérios atual na categoria “segurança e vulnerabilidade”.

Tabela 4 mostra os critérios usados para o MCA.

Tabela 4 - Critérios Analisados

Categoria	Critério e Sub-critério	Categoria	Critério e Sub-critério
Tecnologia		Economia	
1	Copatibilidade de sistema	6	Desafios à Lucratividade no Futuro
1.1	Mercabilidade tecnológica	7	Potencial de exportação
1.2	Disponibilidade de agente redutor	Segurança e Vulnerabilidade	
1.3	Sinergias/conflitos com outras áreas	8	Vulnerabilidade (Dependência de Matéria Prima)
2	Intensidade de intervenção	9	Risco de segurança
3	Potencial de inovação	9.1	Perigo de fogo e explosão
Sociedade & Política		9.2	Perigo à saúde
4	Contribuição para a criação de valor regional	9.3	Perigo durante falha
4.1	Efeito na empregabilidade local	Ecologia	
4.2	Potencial para conservar a estrutura da indústria	10	Emissão de GEE
5	Aceitação social	11	Outros impactos ambientais
		12	Eficiência energética

Racional de Avaliação

Cada uma das três alternativas é pontuada em uma escala de classificação de 1 a 3, dependendo da classificação relativa de um determinado critério. Nota 3 para a alternativa mais adequada e nota 1 para a alternativa menos adequada. Na análise, duas ou mais alternativas podem acabar tendo a mesma nota, ou seja, nenhuma das alternativas é mais ou menos adequada ao critério do que a outra.

A classificação é baseada em um determinado parâmetro quantitativo ou qualitativo que é escolhido para representar o critério. A nota de cada critério é discutida em detalhes na seção 4.2.

Método de Ponderação

A fim de analisar a influência das ponderações dos critérios em cenários críticos para cada tecnologia, foram considerados os cenários que representem

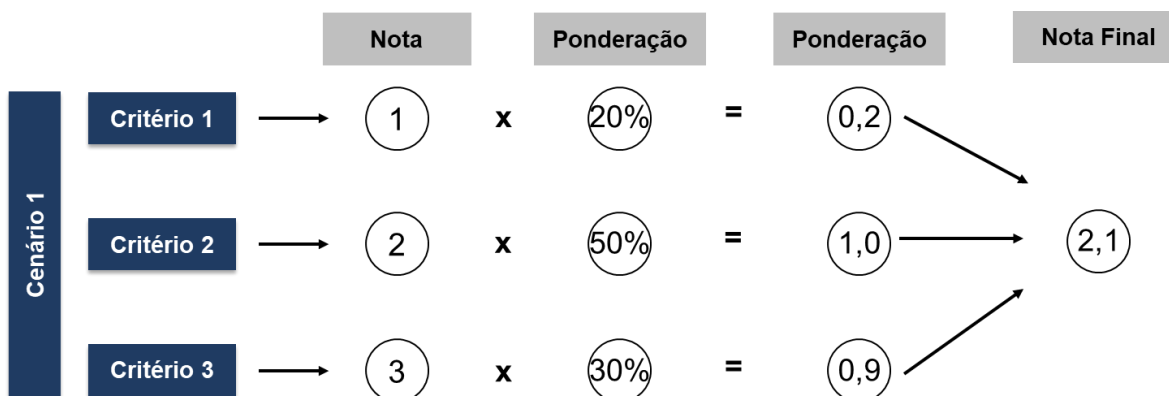
perspectivas exemplares da indústria siderúrgica, de uma organização ambiental e de um governo estadual, além de um cenário padrão onde todos os critérios possuem a mesma importância.

Os dados para representar a ponderação de cada critério em cada cenário são obtidos pelo do método AHP através o Auto Vetor λ calculado.

Para o MCA no cenário padrão, os critérios são ponderados igualmente. Cada uma das cinco categorias é ponderada com 20%. Dentro das categorias, os critérios no mesmo nível de hierarquia recebem o mesmo fator de ponderação. Para avaliar o efeito que a ponderação individual teria sobre o resultado da análise, três perspectivas exemplares da indústria siderúrgica, de uma organização ambiental e do governo estadual são simuladas através dos resultados obtidos pelo método AHP.

A nota final de cada alternativa analisada é definida a soma a soma dos produtos entre a nota dada para cada critério e o fator de ponderação, obtido pelo método AHP, como exemplificado pela Figura 8.

Figura 8 - Exemplo de Cálculo da Nota Final pelo MCA

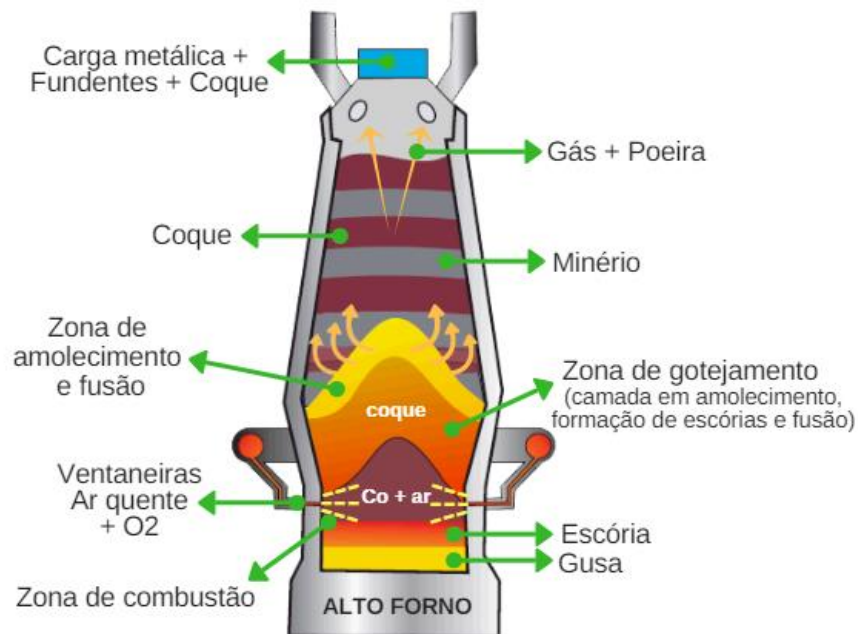


3.3. Tecnologias Siderúrgicas Analisadas

3.3.1. Redução por Alto Forno seguido de Forno Básico a Oxigênio (BF-BOF)

Processo mais comum de obtenção de aço no mundo, representando por quase 70% da produção mundial (World Steel Association, 2014). O minério de ferro é depositado juntamente com o agente redutor, sendo este na maioria das vezes coque ou carvão vegetal, dentro do alto forno no qual irá ocorrer o processo de termorredução do minério, sendo produzido ao final o ferro gusa. Um esquema básico de funcionamento de um alto forno pode ser observado de acordo com a Figura 9:

Figura 9 - Funcionamento de um alto forno

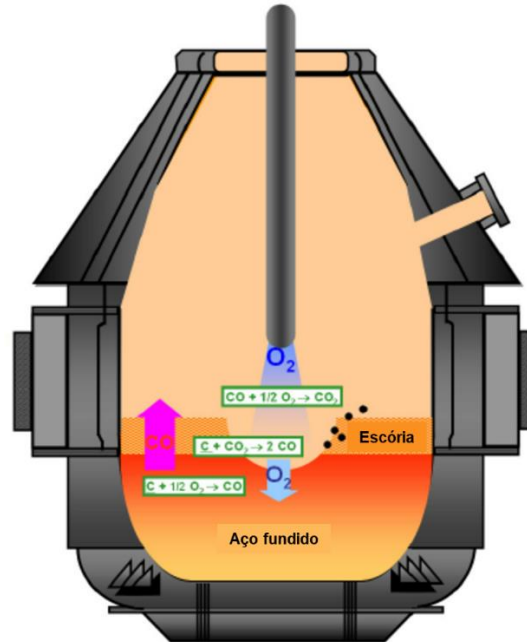


Fonte: Website da empresa Convaço, acessado em 15/10/2019

O processo de produção de aço pelo forno básico a oxigênio (BOF), também conhecido como processo de Linz – Donawitz ou o processo de conversão a oxigênio é um método de fabricação de aço primário no qual ferro gusa fundido rico em carbono é transformado em aço. Soprando oxigênio através de ferro-gusa

líquido reduz o teor de carbono da liga e o transforma em aço de baixo carbono. Uma breve simplificação pode ser observada de acordo com a Figura 10.

Figura 10 - Esquema de um forno básico a Oxigênio



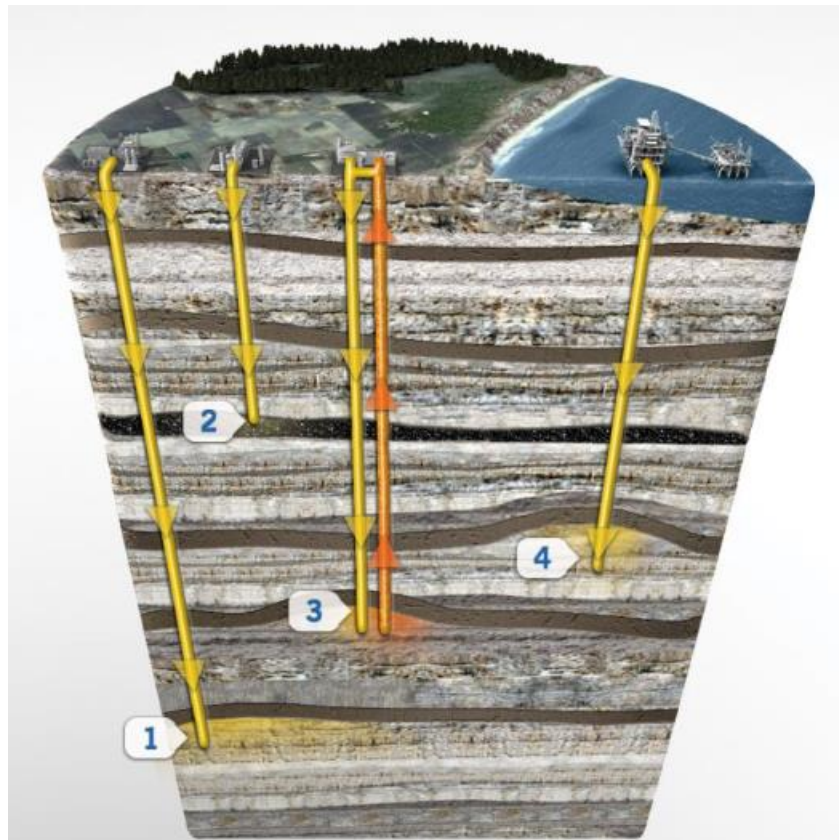
Fonte: Towards the development of a complete model of the BOF converter, Pericleous, 2011

3.3.2. Redução por Alto Forno com Captura e Armazenamento de Carbono (BF-CCS)

O processo de captura e armazenamento de carbono pode assumir um papel importante na diminuição de GEE, já que o método permite capturar, transportar e armazenar em formações geológicas adequadas o gás carbônico emitido por fontes industriais.

O sequestro do CO_2 tem como objetivo impedir que o gás presente nos combustíveis fósseis seja liberado para a atmosfera. Para que isso ocorra, o CO_2 deverá ser isolado para posterior armazenagem. Atualmente, existem 3 tecnologias para a captura do gás carbônico – pós combustão, oxicomustão e pré-combustão. E apesar de suas diferenças processuais, ambas têm como objetivo a captura do gás para armazenamento geológico.

Figura 11 - Esquema de opções de armazenagem geológica de CO₂ em (1) formações salinas, (2) camadas profundas de carvão não mineráveis, (3) para uso melhorado de extração de petróleo ou (4) reservas esgotadas de petróleo e gás



Fonte: Global CCS Institute

A armazenagem do gás carbônico pode ser feita em diversas localidades (Global CCS Institute, 2019), de acordo com a Figura 11 acima em (1) formações salinas, (2) camadas profundas de carvão não mineráveis, (3) para uso melhorado de extração de petróleo ou (4) reservas esgotadas de petróleo e gás.

3.3.3. Redução Direta por Hidrogênio – Processo Circored (H-DR)

O processo Circored é um processo de leito fluidizado de dois estágios, reduzindo diretamente os finos de minério de ferro sem aglomeração, que opera em baixas temperaturas de redução usando hidrogênio puro como gás redutor. O hidrogênio é produzido por meio de reforma de gás natural, mas o hidrogênio de fontes alternativas, como eletrólise da água, também pode ser usado. A primeira planta em escala comercial foi inaugurada em Trinidad em 1999 e possui

capacidade para produzir 65 toneladas de ferro briquetado a quente (HBI) por hora. Os briquetes têm uma metalização de > 95% e zero de carbono.

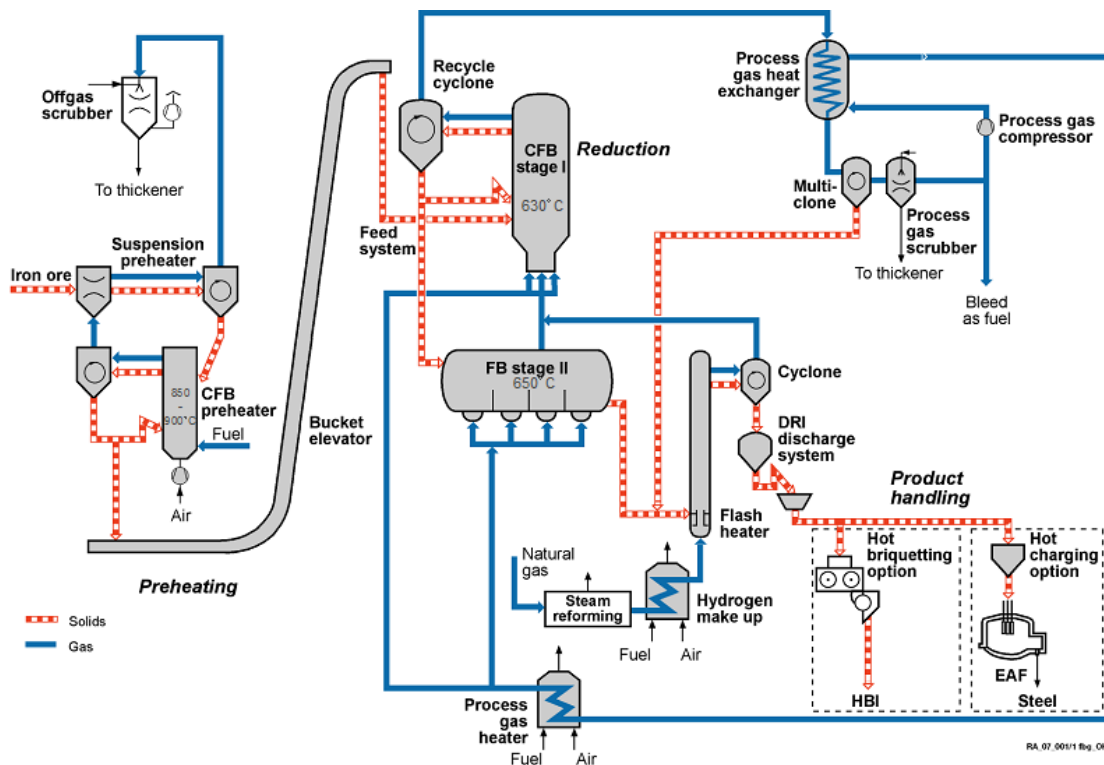
Atualmente este processo é baseado em gás natural para a produção de ferro reduzido direto (DRI) a partir de finos de minério de ferro. É um processo de leito fluidizado de dois estágios. O primeiro estágio de redução é um leito fluidizado circulante (CFB), o segundo estágio de redução é um reator de leito fluidizado borbulhante (BFB). Para o aquecimento do produto de DRI de grão fino à temperatura de briquetagem, é utilizado um aquecedor de flash.

O processo baseado em H_2 produz DRI altamente metalizado ou ferro briquetado a quente (HBI) para alimentação direta em fornos de arco elétrico (EAF) para a produção de aço. O processo reduz o consumo de energia e de emissões e oferece uma solução sustentável para a siderurgia. As características especiais do processo são:

- (i) Uso direto de finos de minério de ferro sem aglomeração prévia, como pelletização ou sinterização, e
- (ii) Operação com hidrogênio puro como gás redutor permite redução com valores muito baixos de emissão de CO_2 e permite a aplicação de baixas temperaturas de redução minimizando as tendências de aderência. O gás hidrogênio é produzido por meio de reforma de gás natural, mas o gás de fontes alternativas, como eletrólise da água, também pode ser usado.

Pode-se observar um esquema do processo de redução direta por hidrogênio na Figura 12.

Figura 12 - Esquema de Funcionamento do Processo Circored



Fonte: Website da empresa Outotec, acessado em 15/10/2019

A principal reação química de redução do processo consiste no gás hidrogênio reduzindo o minério de ferro, produzindo ferro metálico e água segundo a Equação 1:



As emissões de CO₂ (incluindo outros processos relacionados e eletricidade) do processo são relatadas como sendo de 1,2 e 2,02 toneladas / toneladas de aço (Otto, 2017).

4. Resultados e Discussões

Após os métodos terem sido especificados, a seção atual enfoca a avaliação das três alternativas tecnológicas. Primeiro, diferentes conjuntos de fatores de ponderação são calculados através do AHP. Em seguida, as pontuações de classificação são derivadas ao longo de cada critério (ver seção 4.2) e por fim, a nota final é calculada com base no uso desses dados.

4.1. Resultados do AHP

Para cada cenário, foram analisados os critérios com valores baseados na Tabela de Escala Fundamental de forma subjetiva a fim de hierarquizá-los. Cada critério foi analisado de forma a ser mais importante que outro em certo cenário e mantendo a razão de coerência (RC) menor que 10%.

Em cada cenário foi hierarquizado os critérios analisados dando uma nota entre 1 e 9 da Escala Fundamental (Saaty, 1977) onde 1 é onde um critério é de igual importância do que outro e 9 quando um critério possui importância absoluta sobre outro.

A Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7 mostram os valores de hierarquização considerados para cada critério nos cenários siderúrgico, político e ambiental respectivamente.

Tabela 5 - Valores de Hierarquização dos Critérios para o Cenário Siderúrgico

Cenário Siderúrgico						V	V- Normalizado
	Tecnologia	Soc. & Pol.	Economia	Seg.	Meio Amb.		
Tecnologia	1,00	1,00	0,20	3,00	5,00	1,25	18,6%
Soc. & Pol.	1,00	1,00	0,33	3,00	3,00	1,25	18,6%
Economia	5,00	3,00	1,00	5,00	5,00	3,27	49,0%
Segurança	0,33	0,33	0,20	1,00	3,00	0,58	8,7%
Meio Amb.	0,20	0,33	0,20	0,33	1,00	0,34	5,1%
Soma	7,53	5,67	1,93	12,33	17,00	6,68	100,0%

Tabela 6 - Valores de Hierarquização dos Critérios para o Cenário Político

Cenário Político							
	Tecnologia	Soc. & Pol.	Economia	Seg.	Meio Amb.	V	V- Normalizado
Tecnologia	1,00	0,20	0,33	0,20	1,00	0,42	6,4%
Soc. & Pol.	5,00	1,00	3,00	3,00	5,00	2,95	44,9%
Economia	3,00	0,33	1,00	3,00	3,00	1,55	23,6%
Segurança	5,00	0,33	0,33	1,00	5,00	1,23	18,7%
Meio Amb.	1,00	0,20	0,33	0,20	1,00	0,42	6,4%
Soma	15,00	2,07	5,00	7,40	15,00	6,58	100,0%

Tabela 7 - Valores de Hierarquização dos Critérios para o Cenário Ambiental

Cenário Ambiental							
	Tecnologia	Soc. & Pol.	Economia	Seg.	Meio Amb.	V	V- Normalizado
Tecnologia	1,00	1,00	1,00	0,14	0,14	0,46	5,9%
Soc. & Pol.	1,00	1,00	1,00	0,14	0,14	0,46	5,9%
Economia	1,00	1,00	1,00	0,14	0,14	0,46	5,9%
Segurança	7,00	7,00	7,00	1,00	1,00	3,21	41,2%
Meio Amb.	7,00	7,00	7,00	1,00	1,00	3,21	41,2%
Soma	17,00	17,00	17,00	2,43	2,43	7,81	100,0%

Para verificação de coerência dos valores de hierarquização declarados para os critérios, também se calculou o Autovalor λ , o índice de coerência (IC) e a razão de coerência (RC) na Tabela 8:

Tabela 8 - Valores de Verificação de Coerência da Hierarquização dos Critérios para cada Cenário

Verificação de Coerência			
	Cenário Siderúrgico	Cenário Político	Cenário Ambiental
Autovalor	5,341	5,412	5,000
IC	0,085	0,103	0,000
RC	7,6%	9,2%	0,0%

Por fim, os resultados obtidos através do método AHP são resumidos na Tabela 9. Estes resultados serão utilizados como o fator de ponderação na análise multicriterial simples após a pontuação de todos os subcritérios.

Tabela 9 - Resumo dos Resultados Obtidos Através do AHP

	Cenário Siderúrgico	Cenário Político	Cenário Ambiental	Cenário Padrão
Tecnologia	18,6%	6,4%	5,9%	20,0%
Soc. & Pol.	18,6%	44,9%	5,9%	20,0%
Economia	49,0%	23,6%	5,9%	20,0%
Segurança	8,7%	18,7%	41,2%	20,0%
Meio Amb.	5,1%	6,4%	41,2%	20,0%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

4.2. Pontuação dos Subcritérios para o MCA

A pontuação referente a cada critério pode ser consultada abaixo.

4.2.1. Tecnologia

Mercabilidade tecnológica (1.1)

A questão principal é quando as três opções atingem a maturidade econômica, ou seja, estarão prontas para serem implementadas em escala industrial?

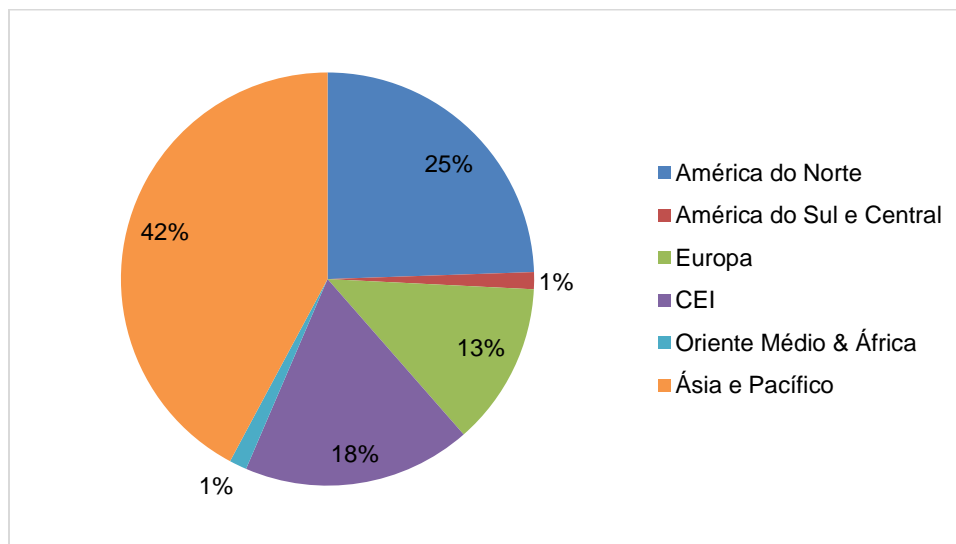
O parâmetro quantitativo para o ranking é o ano de entrada potencial no mercado. Obviamente, a rota incumbente BF-BOF por já estar altamente introduzida no mercado recebe **nota 3**. A rota BF-CCS já é atualmente comercializada e em muitos casos acaba sendo uma extensão da rota BF-BOF. Seu sistema de captura e armazenagem de carbono já são altamente utilizados em programas como a ULCOS e COURSE 50 (**nota 2**). Já a produção de ferro via H-DR também se encontra em situação comercializável. No entanto, as plantas fabris necessitam estar em localizações onde a produção de H₂ seja mais barata, ou seja, locais onde há eletricidade relativamente barata e bom fornecimento de gás natural, já que a principal matéria prima da produção de gás hidrogênio atualmente é o gás natural, com aproximadamente 50% (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association) (**nota 1**).

Disponibilidade de Agente Redutor (1.2)

Existe um fornecimento seguro do agente redutor para as alternativas a curto e longo prazo?

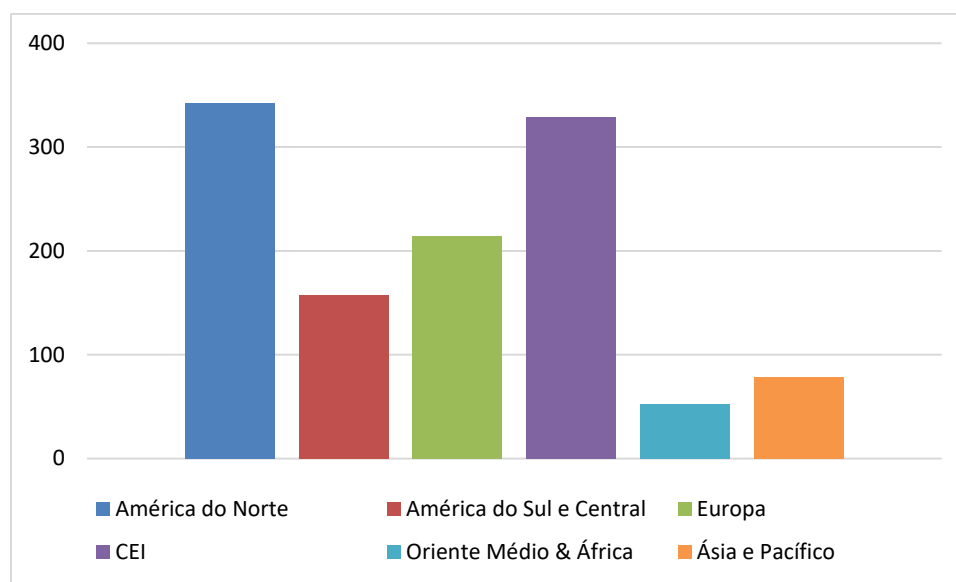
Os parâmetros escolhidos para este critério são a conformidade com a demanda horária e o cumprimento da capacidade anual considerando a perspectiva de curto, médio e longo prazo. O BF-BOF como rota incumbente tem todas as etapas da cadeia de valor harmonizadas e pode garantir a disponibilidade de coque como agentes redutores em todos os momentos. O único risco pode ser a escassez de carvão metalúrgico na perspectiva de longo prazo (**nota 1**). A distribuição e tempo estimado até esgotamento das jazidas de carvão mineral podem ser analisadas de acordo com os dados da *British Petroleum Statistical Review 2018* ilustrados nos gráficos das Figura 9 e 10:

Figura 13 - Distribuição das jazidas de carvão mineral por região



Fonte: British Petroleum Statistical Review, 2018

Figura 14 - Tempo estimado de esgotamento das jazidas de carvão mineral, por região



Fonte: British Petroleum Statistical Review, 2018

A situação para o BF-CCS é quase idêntica. Apesar da possível utilização de reciclagem de gases neste tipo de tecnologia que permite uma utilização de carvão “mais eficiente”, esta tecnologia ainda depende da disponibilidade de carvão metalúrgico como principal processo de redução de minério de ferro (**nota 2**).

Grandes quantidades de gás hidrogênio seriam necessárias para fornecimento para a indústria siderúrgica primária. Atualmente, cerca de 70% do hidrogênio produzido no mundo industrialmente vem do gás natural, que é uma fonte não renovável. Para fins de processos de baixo carbono, hidrogênio via eletrólise e com eletricidade oriunda de fontes renováveis seria o mais ideal, cujo a matéria prima (água) encontra-se em abundância. No entanto, a alta necessidade energética para hidrogênio via eletrólise acaba tornando este processo para fins siderúrgicos inviáveis no momento. Ao longo prazo, seguindo a tendência de barateamento de tecnologias de energias renováveis, a possibilidade de produção do gás pode se tornar viável. Projetos como Asian Renewable Energy Hub, na Austrália Ocidental, tem como objetivo construir 7,5 GW de geração eólica e 3,5 GW de geração solar, com cerca de 8 GW da geração dedicada à produção de hidrogênio para uso doméstico e para exportação (Asian Renewable Energy Hub, 2019). Vários outros projetos para produzir hidrogênio a partir de recursos

renováveis dedicados em várias partes do mundo estão em preparação ou foram anunciados. No entanto, uma escalabilidade a nível de fornecimento de indústria siderúrgica pode não ser alcançado até 2060 (**nota 2**).

Sinergias/Conflitos com Outras Áreas (1.3)

Existem sinergias ou conflitos com desenvolvimentos em outros setores em 2060 (por exemplo, sinergias através da aplicação de H₂ em transporte ou geração de energia, conflitos com armazenamento de CCS e uso concorrente de armazenamento subterrâneo)?

Os parâmetros em foco são o número e a intensidade das sinergias, por um lado, e o número de conflitos, por outro. O BF-BOF é estabelecido como a rota predominante; portanto, não são percebidos conflitos importantes com outros setores. Pelo contrário, muitas sinergias existem e existirão potencialmente em 2060 com a indústria de energia e cimento que usa resíduos de processo como escória de alto-forno e gases de processo (**nota 2**). Para o BF-CCS, a reciclagem de gases de processo e escória é significativamente reduzida através da tecnologia CCS (TGR). O alto custo de investimento para uma infraestrutura de CO₂ ou a falta de aceitação do público podem impedir investimentos nas estruturas necessárias.

O uso concorrente de locais de armazenamento subterrâneo em 2060 pode afetar a implementação das capacidades de armazenamento de energia necessárias (**nota 1**). Nenhum conflito importante é esperado para o H-DR. Alto custo de investimento em infra-estrutura poderia inibir o investimento nesse transportador de energia alternativa. Em contraste, como os diferentes cenários de energia destacam a importância geral do H₂ para o futuro sistema energético, muitas sinergias são esperadas relacionadas a uma ampla aplicação do uso de hidrogênio em diferentes setores em 2060 (como armazenamento de energia, transporte, aplicações industriais e redes). e estabilização do sistema) (Balat, 2008) (**nota 3**).

Intensidade de intervenção (2)

Quão severas são as mudanças através da implementação das alternativas para a indústria siderúrgica?

Os parâmetros representativos são a profundidade e a amplitude das mudanças que cada tecnologia pode causar nos processos, etapas de valor, *know-how*, estrutura e concorrência da indústria siderúrgica. A rota BF-BOF sem alterações e, portanto, nenhuma implementação disruptiva tem a primeira classificação (**nota 1**).

O BF-CCS, que é geralmente baseado na rota convencional, solicita mudanças em relação ao sequestro de carbono, transporte e armazenamento. Essas mudanças são sem dúvida significativas, mas concentram-se “apenas” no final da rota, pois a etapa de produção ainda é baseada na rota convencional. No geral e em comparação com outros processos, isso resulta na segunda classificação (**nota 2**). Na tecnologia H-DR, muito além da própria mudança de processo em si, toda a cadeia de produção e fornecimento de hidrogênio teria que ser desenvolvida para sustentar a indústria. Tecnologias e processos de distribuição, transmissão e armazenagem de hidrogênios iriam necessitar alto investimento e desenvolvimento para barateamento, uma vez que esse gás é de alto risco para transporte devido à sua facilidade de combustão.

Soluções de transporte a longa distância poderiam ser a construção de gasodutos de hidrogênio, adaptação dos atuais gasodutos, diluição da concentração do gás hidrogênio com outros gases para barateamento de produção e melhor segurança ou até mesmo liquefação do gás para transporte interoceânico. De qualquer forma, grandes investimentos e mudanças seriam necessárias para adaptação através da utilização deste agente redutor (**nota 3**).

Potencial de inovação (3)

Quão alto é o potencial de melhoria futura das alternativas dentro do período de investigação?

O parâmetro que descreve este critério é o potencial de desenvolvimento de cada alternativa a partir de uma perspectiva de longo prazo. O potencial de inovação adicional é muito pequeno para a rota BF-BOF, uma vez que tal tecnologia é considerada o atual sistema implantado de produção de aço na maioria dos países (**nota 1**). O Alto forno da maneira que se é conhecido existe há mais de seis séculos,

tendo seu potencial de inovação sido praticamente todo explorado, com melhorias em seus processos, eficiência energética e uso de matérias primas. Já o BF-CCS, apesar de haver diversas plantas piloto já instaladas (ULCOS, 2017) e previsão de comercialização em 2020, possui algumas áreas de inovação relacionadas ao desenvolvimento do transporte de CO₂ e especialmente à captura e armazenamento de CO₂, mas quanto ao processo de redução do ferro efetivamente, é bem similar à rota BF-BOF (**nota 2**).

O H-DR ainda é uma tecnologia jovem, com muitas áreas de melhoria relacionadas à produção de hidrogênio, armazenamento e sinergias. Também se espera que a redução direta baseada em hidrogênio seja melhorada para reduzir a aderência de partículas e ter capacidades e eficiência de processo mais altas (**nota 3**).

4.2.2. Sociedade & Política

Efeito na empregabilidade local (4.1)

Novo emprego é criado através das alternativas?

O foco neste parâmetro consiste em analisar o potencial de criação de empregos das alternativas analisadas. Ao se deparar com o setor siderúrgico brasileiro, o método por BF-BOF se consiste em um sistema já maduro e estabelecido, com uma capacidade instalada de 50,4 milhões de t/ano de aço bruto (Instituto Aço Brasil, 2019) em que neste sistema a variação de empregos obedece a demanda de aço dita pela demanda econômica, mas sempre até onde sua capacidade instalada atende (**nota 1**). Para o BF-CCS, uma pequena porção de novos empregos podem ser criados devido à instalação e utilização do processo de captura de carbono (**nota 2**). O processo HD-R atualmente é considerado um método com alto potencial de geração de empregos tanto diretos quanto indiretos devido à quantidade de investimento em pesquisa e plantas a serem construídas, já que a mesma não pode ser ativada em uma planta já existente, no caso uma planta de BF-BOF (**nota 3**). Todo o ecossistema gerado em torno da produção, transmissão, distribuição e armazenagem de hidrogênio também necessitaria de nova mão de obra e investimentos.

Potencial para conservar a estrutura da indústria (4.2)

Como as alternativas influenciam a estrutura da indústria intimamente relacionada à indústria do aço?

O parâmetro é o tipo de influência através das diferentes alternativas sobre estruturas industriais fora da indústria siderúrgica (por exemplo, cimento, construção, automotivo, fabricação etc.) sobre a tecnologia ao entrar no mercado. No caso da alternativa BF-BOF, as estruturas industriais existentes que estão fortemente relacionadas à indústria siderúrgica (ou seja, indústria cimenteira, automotiva, construção e manufatura) não sofreriam mudanças significativas mesmo a médio e longo prazo. Essas indústrias de consumo intensivo de aço não seriam inteiramente supridas pelas novas tecnologias aqui citadas. Dentre vários motivos, como custo de energia, matéria prima, agente redutor, o motivo mais provável da baixa mudança nas indústrias dependentes seria o tamanho do parque industrial, mesmo em 2060, das novas tecnologias comparadas com o atual parque industrial siderúrgico baseado na tecnologia BF-BOF, especialmente no Brasil.

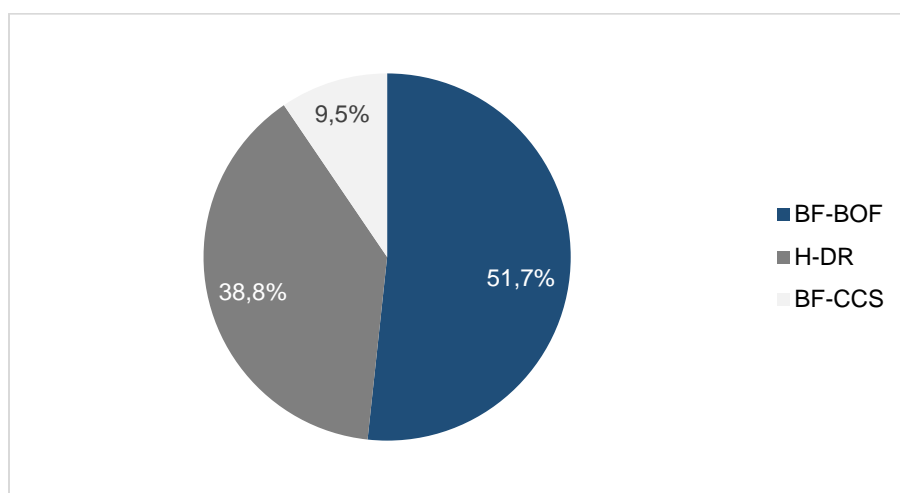
Logo, tanto os fornecedores dessa cadeia quanto os consumidores seriam pouco afetados (**nota 3**). O BF-CCS, que é geralmente baseado na rota convencional, solicita mudanças em relação ao sequestro de carbono, transporte e armazenamento. Essas mudanças são sem dúvida significativas, mas concentram-se “apenas” no final do processo, pois a etapa de produção ainda é baseada na rota convencional. No geral e em comparação com outros processos, isso resulta na segunda classificação (**nota 2**). Diferentemente da tecnologia BF-BOF, H-DR poderia influenciar, além das atuais indústrias íntimas da indústria siderúrgica, outras diversas indústrias devido ao consumo de hidrogênio. Pesquisas como *The Future of Hydrogen* (IEA, 2019) apontam desenvolvimentos de setores como automobilístico usando hidrogênio como combustível, fornecimento de calor, geração de eletricidade, meios de transporte em geral (**nota 1**).

Aceitação social (5)

Quão alta é a aceitação dentro do público em relação às alternativas?

O parâmetro neste item é a aceitação aparente do público hoje quanto às alternativas. A aceitação de um público sobre uma determinada alternativa considera diversos fatores, como por exemplo questões sociais, políticas, econômicas, ambientais ou até mesmo de segurança. A qualificação da pesquisa referente a este item pode não representar estatisticamente a opinião de uma população por se tratar de uma amostra relativamente pequena apesar do elevado grau de conhecimento sobre o assunto pela população da amostra. Com base em pesquisa com alunos e professores da Universidade de São Paulo, a aceitação social pôde ser analisada de acordo com o gráfico da Figura 11:

Figura 15 - Aceitação Social das Alternativas Analisadas



A aceitação da tecnologia BF-BOF é a maior dentre as analisadas, comumente sendo acordada como uma alternativa mais eficiente com menor custo de produção e mais segura em questões trabalhistas. No entanto, a questão ambiental relativa ao BF-BOF, principalmente quanto à emissão de CO₂ e utilização de agente redutor, foi um fator limitante ao aumento desta fração (**nota 3**). A segunda alternativa mais aceita foi a HD-R, comumente sendo acordada como uma alternativa mais sustentável em relação às outras tecnologias (**nota 2**). No entanto, custo de produção, disponibilidade de agente redutor e perigo diante do manuseio de gás hidrogênio foram fatores limitantes ao aumento da fração de H-DR. A última alternativa foi BF-CCS, muito criticada por ainda utilizar materiais fósseis como

agente redutor, além do armazenamento ainda puder trazer limitações quanto a capacidade de retenção do gás (**nota 1**).

4.2.3. Economia

Desafios à Lucratividade no Futuro (6)

Quais serão os principais desafios para obter a lucratividade das alternativas analisadas no futuro?

Este item refere-se à dificuldade das alternativas em obter lucratividade no futuro levando em conta seus principais desafios, sendo a maior nota para a alternativa que possuir menor barreira de lucratividade.

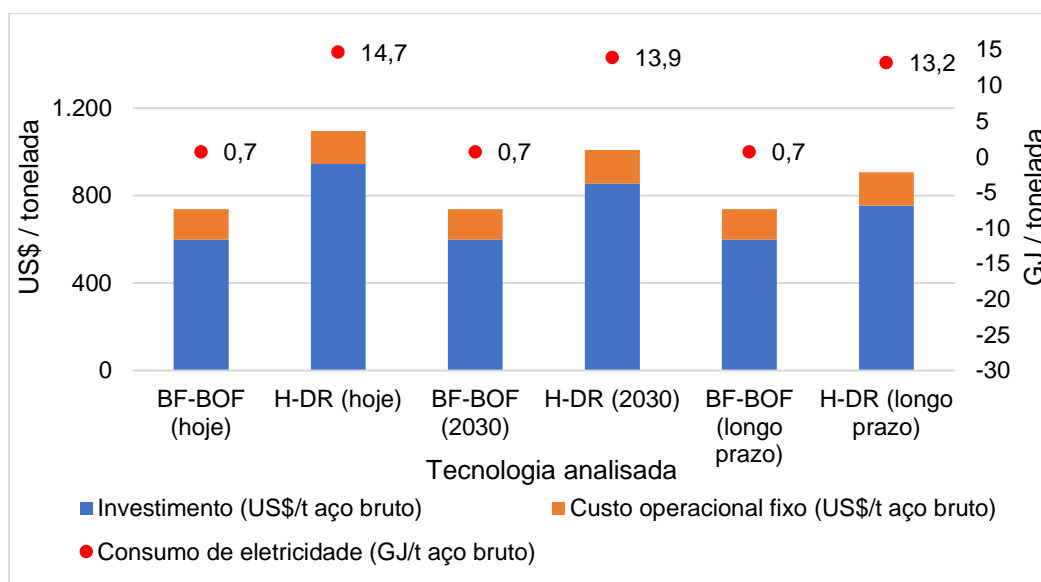
A alternativa via BF-BOF se dispõe de desafios futuros referentes à principalmente à disponibilidade de agente redutor, no caso o carvão, seguido de políticas ambientais mais severas, como por exemplo a maior necessidade ou dificuldade em comercializar um material “sujo” de carbono e que necessita de grandes quantidades de créditos de carbono, que serão muito mais utilizados no futuro. No entanto, para a relativa grandeza do tamanho da indústria siderúrgica atual, esse futuro pode aparentar estar mais distante em um limiar além do limite de 40 anos em diante até 2060. A grande questão neste item é a durabilidade e viabilidade do processo até a data analisada, que é um período relativamente curto em relação aos mais de seiscentos anos de existência da indústria siderúrgica que, apesar das futuras políticas ambientais mais severas e possível queda (se não houver mais descobertas de jazidas de carvão), continuará sendo um processo com aproximadamente sua lucratividade marginal neste “curto” período a seguir (**nota 3**).

A rota BF-CCS possui praticamente os mesmos desafios da rota anterior, mas com um leve desconto quanto a cobranças severas ambientais e uma menor necessidade de agente redutor. Seu maior desafio seria a aplicação de políticas e investimentos para incentivo do uso de armazenamento subterrâneo, que poderia dificultar sua instalação e usabilidade (**nota 2**).

A alternativa HD-R obviamente é a que possui os maiores desafios entre as alternativas analisadas. A viabilidade de uma rota lucrativa de forma a se obter

ganhos de escala através de tamanho de indústria, fornecedores apropriados e um ecossistema industrial mútuo com a produção e consumo de hidrogênio em um horizonte relativamente curto é remota. A necessidade de incentivos fiscais, políticos e investimentos financeiros ainda é alta para esta tecnologia relativamente recente. Em uma atmosfera onde o objetivo é diminuir, ou até mesmo anular, as emissões de carbono, uma produção de hidrogênio também necessita de uma matriz energética renovável, que também atualmente não reflete a realidade da maioria dos países e que também não conseguiriam transformar sua matriz energética em sustentável no mesmo período (**nota 1**). Apesar dos grandes desafios, espera-se uma diminuição do custo de investimento e operação a longo prazo para a tecnologia H-DR como pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Projeção de custo por tecnologia



Fonte: IEA, 2019

Potencial de exportação a longo prazo do produto siderúrgico (7.2)

Quão alta é a demanda global por produtos siderúrgicos de cada uma das rotas de produção considerando os mercados futuros de carbono?

O parâmetro é o potencial relativo de exportação de aço de cada alternativa em 2060, quando é provável que preços de carbono serão significativos em todo o mundo. A alta competitividade internacional leva a maior lucratividade e criação de

valor no Brasil. Não se espera que a alternativa BF-BOF tenha um alto potencial de exportação para 2060 porque o aço com uma pegada de CO₂ alta se torna menos popular no mercado mundial (ABNT e *CarbonTrust*, 2016) e o aumento do custo de produção pode causar preços não competitivos (**nota 1**).

A alternativa BF-CCS produz aço com uma pegada de CO₂ um pouco menor e pode permanecer lucrativa no mercado alemão um pouco depois de 2060, levando a um potencial de exportação um pouco melhor do que para o BF-BOF (**nota 2**).

É esperado que a alternativa H-DR tenha um alto potencial de exportação, porque o aço de alta qualidade "verde" terá alta demanda. Tal rota pode permanecer lucrativa e competitiva, mesmo em uma situação de mercado desafiadora no Brasil no final de 2060 (**nota 3**).

4.2.4. Segurança e Vulnerabilidade

Dependência de matéria prima (8)

Quão alta é a dependência de matérias-primas?

Apesar das três tecnologias presentes dependerem de minério de ferro, cada uma possui sua particularidade para outras matérias primas. Para o caso das rotas BF-BOF e BF-CCS, ambas tecnologias são altamente dependentes de coque para reduzir o minério (**nota 1**) considerando que carvão metalúrgico de qualidade se encontra cada vez mais escasso na natureza.

Para o caso do HD-R, a principal matéria prima é o gás hidrogênio H₂. Por ser muito caro até o momento, o método acaba se tornando inconveniente por elevar o custo do produto (**nota 2**). Novamente, projetos como *Asian Renewable Energy Hub* são um dos projetos que visam obter maior fornecimento de hidrogênio a partir de energia renovável e via eletrólise. Atualmente as tecnologias que utilizam hidrogênio como agente redutor o fazem utilizando uma mistura com monóxido de carbono.

Perigo de fogo e explosão (9.1)

Quão alto é o risco de incêndio e explosão ao longo da cadeia de valor das alternativas?

O parâmetro é o risco de incêndio e explosões de acordo com as substâncias utilizadas em cada alternativa tecnológica. Pelas alternativas BF-BOF e BF-CCS, ambas utilizam grandes quantidades, além de similares, de monóxido de carbono e gás natural, o que abre um grande leque de possibilidades para acidentes com fogo (**nota 1**). O sequestro de CO₂ da rota BF-CCS não tem impacto sobre o risco de incêndio.

Dado que o gás hidrogênio é tão inflamável quanto o gás natural, além do fato do processo H-DR também utilizar monóxido de carbono apesar de em menor quantidade, a alternativa também possui riscos significativos de incêndio (**nota 2**).

Perigo à saúde (9.2)

Quão alto é o risco de danos à saúde humana através das alternativas (além do fogo e explosão)?

O parâmetro avaliado é o risco à saúde aos ser humano com base nas principais substâncias utilizadas em cada alternativa. Em cada caso, a substância é analisada através de uma percepção entre risco “Insignificante”, “Médio”, “alto” e “Muito alto”, variando com pontuações entre 0 e 4 respectivamente. A soma de todas as substâncias usadas é então usada para classificar as três alternativas em relação ao perigo para a saúde (ver Tabela 10).

A alternativa BF-BOF com uma nota cumulativa de risco à saúde de 8 recebe a classificação 3 (**nota 2**). A BF-CCS recebe a última classificação devido aos riscos potenciais adicionais para a saúde do transporte de CO₂, CO e armazenamento subterrâneo. O vazamento maciço de gás CO₂ e CO poderia ter um impacto mortal, como demonstrado na catástrofe do Lago Nyos em 1986 ilustrado a Figura 13, (**nota 1**).

Figura 17 - Consequências da catástrofe do Lago Nyos



Fonte: BBC News, 2018

Nesse acidente, apesar de ter sido uma catástrofe natural, a explosão, além de ter causado grande choque físico, retirou temporariamente o oxigênio disponível na atmosfera local, substituída por CO_2 e CO , matando quase 2.000 pessoas e 3.000 cabeças de gado. H-DR com a menor nota de risco à saúde de 2 recebe classificação 1 (**nota 3**). Os riscos dos gases utilizados (Hidrogênio e Oxigênio) no processo representam baixa exposição de risco à saúde humana quando comparados aos outros gases utilizados nos outros processos.

Tabela 10 - Avaliação de segurança de alternativas de fabricação de aço

Substância Perigosa	Perigo de Fogo e Explosão	Perigo à Saúde	Pontuação Correspondente	
BF-BOF				
Gás Natural	Muito alto	Médio	4	2
Oxigênio	Alto	Insignificante	3	0
Dióxido de Carbono	Insignificante	Médio	0	2
Monóxido de Carbono	Muito alto	Muito alto	4	4
Soma			11	8
BF-CSS				
Gás Natural	Muito alto	Médio	4	2
Oxigênio	Alto	Insignificante	3	0
Dióxido de Carbono (gasoso)	Insignificante	Médio	0	2
Dióxido de Carbono (subterrâneo)	Insignificante	Alto	0	3
Monóxido de Carbono	Muito alto	Muito alto	4	4

Continuação

Substância Perigosa	Perigo de Fogo e Explosão	Perigo à Saúde	Pontuação Correspondente	
Soma			11	11
H-DR				
Hidrogênio	Muito alto	Médio	4	2
Oxigênio	Alto	Insignificante	3	0
Soma			7	2

Perigo durante a pior das hipóteses (9.3)

Qual risco existe em um pior caso de falha para vidas humanas e saúde?

Neste item analisa-se a gravidade e probabilidade de falha do pior caso. A alternativa BF-BOF possui um risco considerável de explosão ou falha do alto forno, podendo causar um grande impacto em suas proximidades. Acidentes recentes como a explosão no gasômetro da Usiminas em Ipatinga/MG em agosto de 2018 e o incêndio causado por falha no alto forno 3 da CSN em Volta Redonda/RJ em abril de 2018 são exemplos demonstram os perigos e danos causados por rota tecnológica (**nota 3**).

A alternativa BF-CCS pode ser considerada com um risco maior do que a alternativa anteriormente citada pois ainda carrega um “risco extra” relacionado ao transporte e armazenamento de CO₂ e CO, nos quais acarretam riscos de vazamentos e explosões (**nota 2**).

A alternativa através da redução por hidrogênio acarreta grandes perigos de explosão, uma vez que seu principal agente redutor é o próprio H₂, um gás altamente inflamável. Um acidente por explosão acarreta o maior risco para essa tecnologia (**nota 1**).

4.2.5. Meio Ambiente

Emissão de GEE (10)

Quão alta é a emissão específica de GEE por tonelada de aço bruto com a respectiva alternativa?

Neste item avalia-se a quantidade de CO₂ produzida por tonelada de produto final em cada rota analisada. Com base em pesquisas diretas sobre emissão de CO₂ através de diversas tecnologias siderúrgicas (Otto, 2017), pode-se comparar os valores de emissões do gás de forma qualitativa. A rota através do alto forno convencional atualmente é a que possui maior quantidade de CO₂ por tonelada de ferro gusa produzido, sendo de aproximadamente 1.099 kg CO₂/t ferro gusa (**nota 1**).

A rota BF-CCS acaba emitindo menos CO₂ obviamente devido à sua capacidade de armazenagem do gás, que abaixa o valor para até 392 kg CO₂/t ferro gusa (**nota 2**). Já a alternativa H-DR, considerando apenas a emissão de gás do processo, ou seja, utilizando uma fonte de energia “verde” e gás natural apenas para fornecimento de calor para aquecimento do minério de ferro acaba produzindo cerca de 409 CO₂/t HBI (**nota 3**).

Outros impactos ambientais (11)

Quão alto é o dano ambiental que não seja através da emissão de GEE?

O parâmetro que representa este critério é uma estimativa muito ampla dos principais efeitos negativos que cada alternativa tem no ambiente, além da emissão de GEE. A alternativa BF-BOF emite poeira, principalmente do forno de coque e do alto-forno que polui o ar (**nota 2**).

A alternativa BF-CCS emite um pouco menos de poeira, mas envolve armazenamento subterrâneo de CO₂, por outro lado, que pode levar a danos ambientais em caso de vazamento. As incertezas sobre os efeitos a longo prazo de que o armazenamento subterrâneo de carbono talvez ainda precise ser mais bem avaliado (**nota 1**). A alternativa H-DR emite pequenas quantidades de poeira e águas residuais do forno elétrico a arco. O agente redutor hidrogênio é ecologicamente inofensivo (**nota 3**).

Eficiência energética (12)

Quanta energia final é usada (incluindo a produção de agente redutor) para cada alternativa?

O parâmetro em foco é a demanda final de energia de cada alternativa. Baseando-se nos estudos de (Otto, 2017), é possível consultar a demanda energética média para cada rota tecnológica. A rota BF-BOF possui a maior demanda energética sendo 15,95 GJ / tonelada _{ferro gusa} (**nota 1**). A alternativa BF-CCS com uma demanda reduzida de carvão metalúrgico por meio da reciclagem de gás de topo tem uma demanda de energia de 14,62 GJ / tonelada _{ferro gusa} (**nota 2**). Já a alternativa H-DR possui a menor demanda de energia, sendo 14,39 GJ / tonelada _{HBI} (**nota 3**).

4.3. Ponderação

Nesta seção os resultados do AHP (seção 4.1) são utilizados como o fator de ponderação dos critérios para cálculo da nota final do MCA.

Para o cenário padrão, utiliza-se uma ponderação equivalente para todos os critérios, ou seja, 20% para cada um. Para os outros cenários, foram consultados os resultados obtidos pelo método AHP utilizado. Para cada subcritério composto por outros subcritérios inferiores (por exemplo “Compatibilidade de Sistema”, em tecnologia, “Contribuição para criação de valor regional”, em sociedade e política, e “Risco de segurança”, em segurança e vulnerabilidade), estes possuem seus fatores de ponderação referentes divididos igualmente.

Através da Figura 18, Figura 19, Figura 20 e Figura 21, é possível analisar graficamente a ponderação considerada para cada cenário.

Figura 18 - Gráfico de ponderação para o cenário padrão

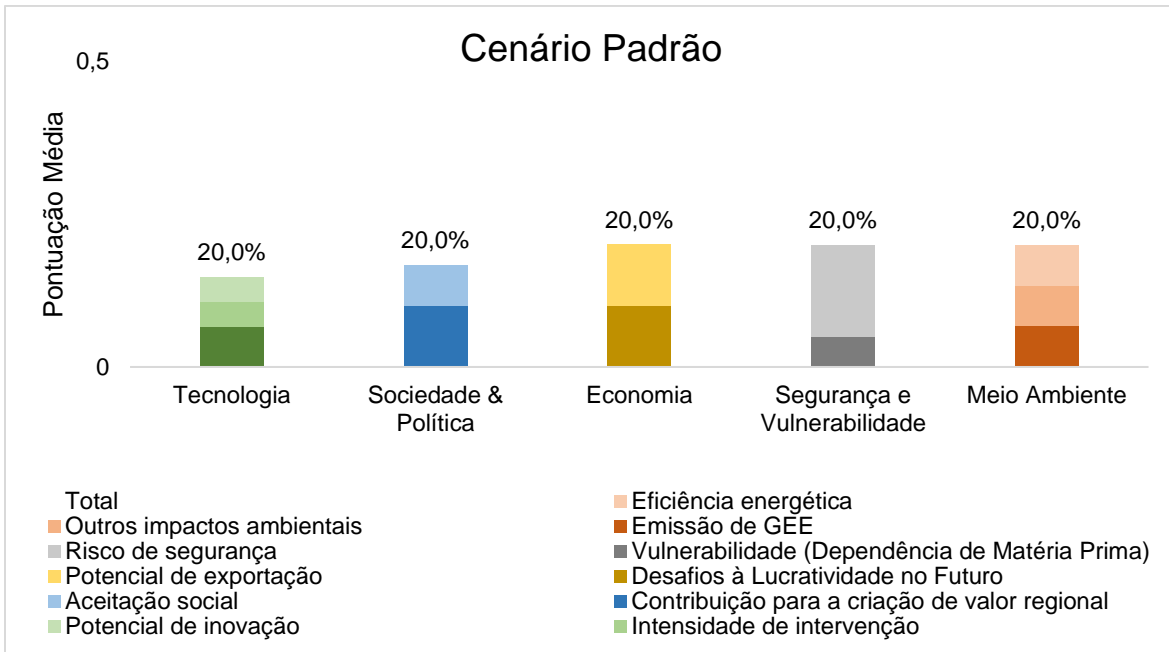


Figura 19 - Gráfico de Ponderação para o cenário siderúrgico

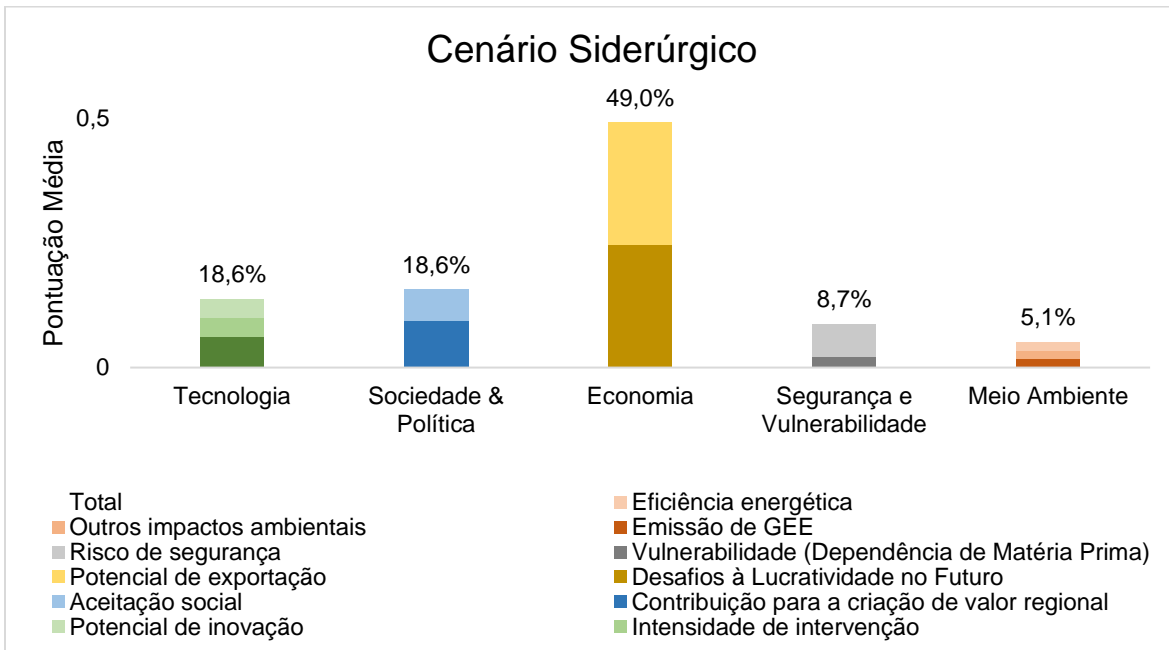


Figura 20 - Gráfico de ponderação para o cenário político

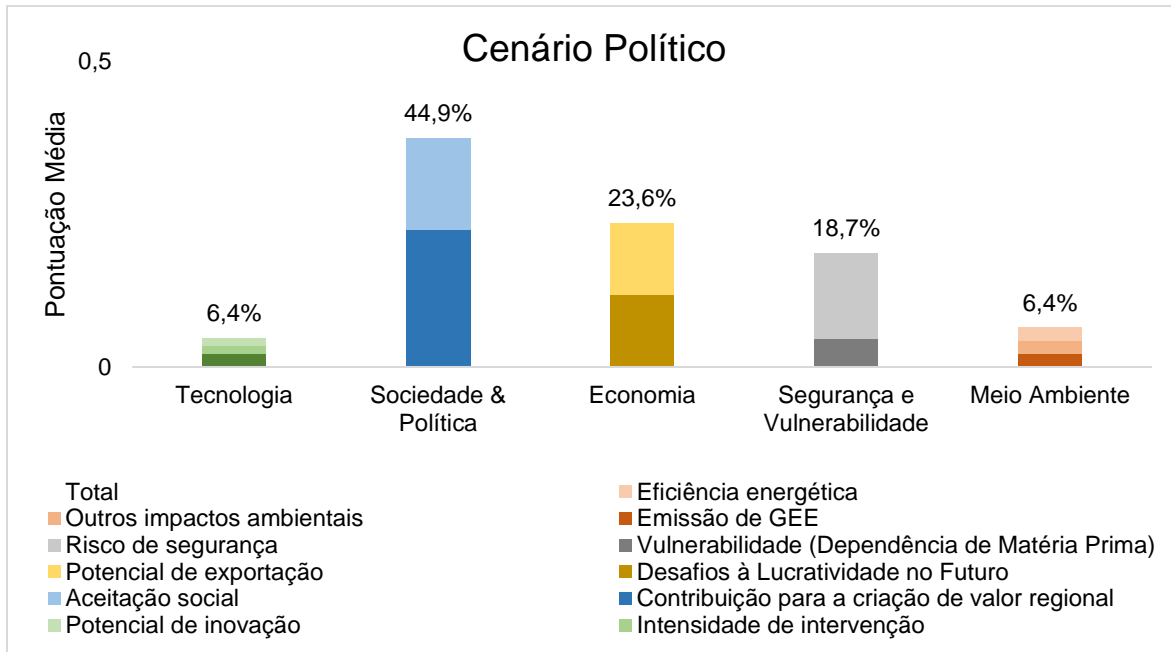
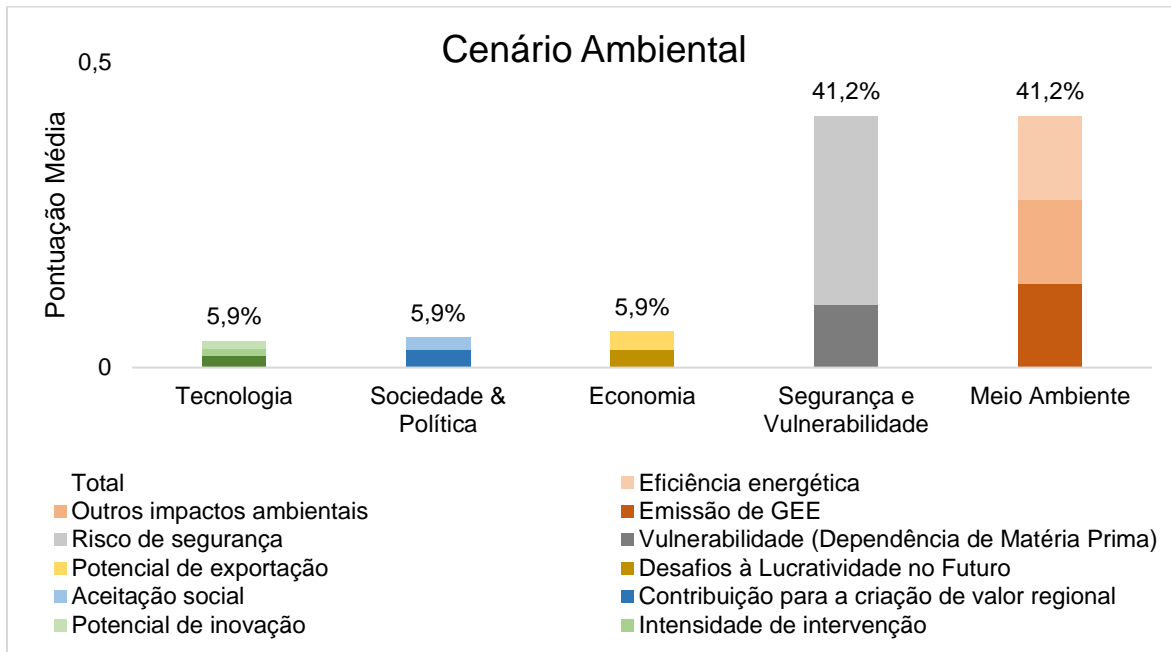


Figura 21 - Gráfico de ponderação para o cenário ambiental



4.4. Resumo dos Resultados

Os resultados de forma consolidada podem ser consultados na Tabela 11 abaixo bem como a ponderação utilizada para cada cenário analisado.

Tabela 11 – Pontuação e Ponderação aplicadas no MCA

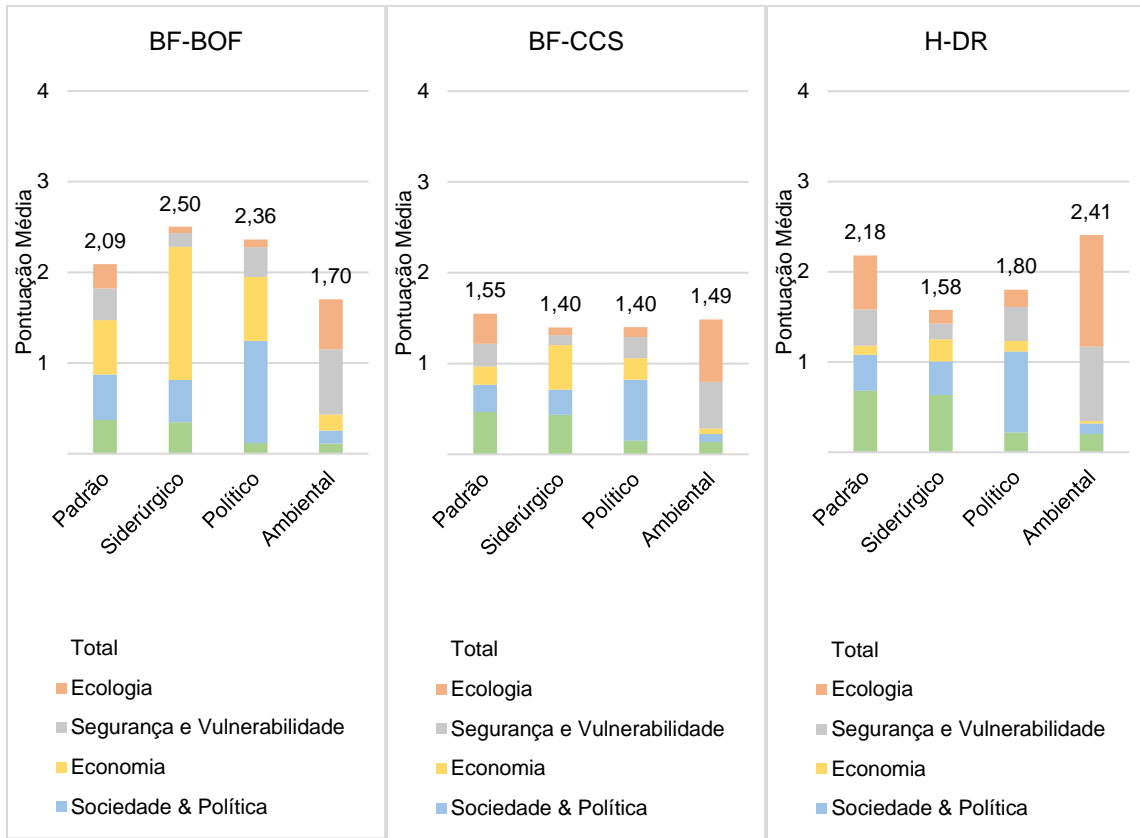
Categoria	Critério e Sub-critério	Pontuação Correspondente		
		BF-BOF	BF-CCS	H-DR
<u>Tecnologia</u>		1,3	1,9	2,8
1	Copatibilidade de sistema	2,0	1,7	2,3
1.1	Mercabilidade tecnológica	3	2	1
1.2	Disponibilidade de agente redutor	1	2	3
1.3	Sinergias/conflitos com outras áreas	2	1	3
2	Intensidade de intervenção	1	2	3
3	Potencial de inovação	1	2	3
<u>Sociedade & Política</u>		2,5	2,0	1,5
4	Contribuição para a criação de valor regional	2,0	2,0	2,0
4.1	Efeito na empregabilidade local	1	2	3
4.2	Potencial para conservar a estrutura da indústria	3	2	1
5	Aceitação social	3	2	1
<u>Economia</u>		3,0	2,0	1,0
6	Desafios à Lucratividade no Futuro	3	2	1
7	Potencial de exportação	3	2	1
<u>Segurança e Vulnerabilidade</u>		1,5	1,2	2,0
8	Vulnerabilidade (Dependência de Matéria Prima)	1	1	2
9	Risco de segurança	2,0	1,3	2,0
9.1	Perigo de fogo e explosão	1	1	2
9.2	Perigo à saúde	2	1	3
9.3	Perigo durante falha	3	2	1
<u>Meio Ambiente</u>		1,3	1,7	3,0
10	Emissão de GEE	1	2	3
11	Outros impactos ambientais	2	1	3
12	Eficiência energética	1	2	3

Tabela 12 - Ponderação das pontuações

Categoria	Critério e Sub-critério	Ponderação			
		Padrão	Siderúrgico	Político	Ambiental
Tecnologia		20,0%	18,6%	6,4%	5,9%
1	Copatibilidade de sistema	6,7%	6,2%	2,1%	2,0%
1.1	Mercabilidade tecnológica	4,0%	3,7%	1,3%	1,2%
1.2	Disponibilidade de agente redutor	4,0%	3,7%	1,3%	1,2%
1.3	Sinergias/conflitos com outras áreas	4,0%	3,7%	1,3%	1,2%
2	Intensidade de intervenção	6,7%	6,2%	2,1%	2,0%
3	Potencial de inovação	6,7%	6,2%	2,1%	2,0%
Sociedade & Política		20,0%	18,6%	44,9%	5,9%
4	Contribuição para a criação de valor regional	10,0%	9,3%	22,5%	2,9%
4.1	Efeito na empregabilidade local	5,0%	4,7%	11,2%	1,5%
4.2	Potencial para conservar a estrutura da indústria	5,0%	4,7%	11,2%	1,5%
5	Aceitação social	10,0%	9,3%	22,5%	2,9%
Economia		20,0%	49,0%	23,6%	5,9%
6	Desafios à Lucratividade no Futuro	10,0%	24,5%	11,8%	2,9%
7	Potencial de exportação	10,0%	24,5%	11,8%	2,9%
Segurança e Vulnerabilidade		20,0%	8,7%	18,7%	41,2%
8	Vulnerabilidade (Dependência de Matéria Prima)	5,0%	2,2%	4,7%	10,3%
9	Risco de segurança	15,0%	6,5%	14,0%	30,9%
9.1	Perigo de fogo e explosão	5,0%	2,2%	4,7%	10,3%
9.2	Perigo à saúde	5,0%	2,2%	4,7%	10,3%
9.3	Perigo durante falha	5,0%	2,2%	4,7%	10,3%
Ecologia		20,0%	5,1%	6,4%	41,2%
10	Emissão de GEE	6,7%	1,7%	2,1%	13,7%
11	Outros impactos ambientais	6,7%	1,7%	2,1%	13,7%
12	Eficiência energética	6,7%	1,7%	2,1%	13,7%
Total		100%	100%	100%	100%

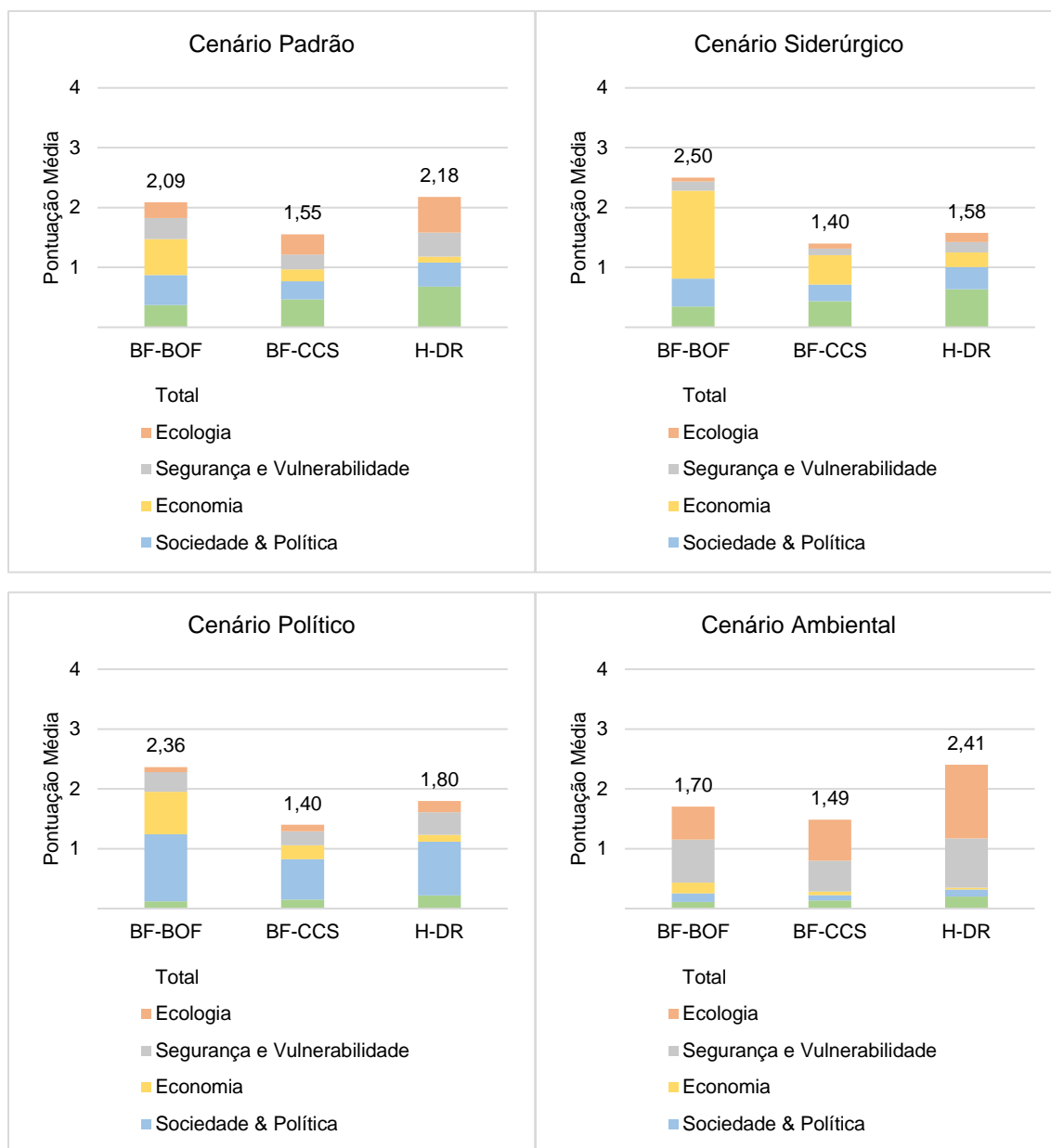
A pontuação final para análise do resultado de forma consolidada pode ser analisada graficamente abaixo, na Figura 22. A pontuação final de cada alternativa analisada se consiste na soma do produto de cada subcritério pelo seu fator de ponderação.

Figura 22 - Pontuação final de cada tecnologia, por tecnologia



A análise dos resultados por cenário também pode ser analisada na Figura 23 abaixo:

Figura 23 - Pontuação final de cada tecnologia, por cenário



Através dos resultados obtidos, é possível analisar uma alternativa tecnológica preferencial para cada cenário. No cenário padrão, onde há uma ponderação equivalente para todos os critérios, há uma preferência para a tecnologia HD-R, que acaba sendo beneficiada pela forte pontuação nos critérios referentes à tecnologia e ambiente dado o grande potencial a ser explorado com a tecnologia além de sua capacidade de ser livre de carbono. No cenário siderúrgico, o BF-BOF possui maior pontuação. Neste cenário, BF-BOF possui um resultado elevado devido à sua forte

pontuação no critério referente à economia. Apesar de todos os lados positivos referentes às outras tecnologias, o alto investimento em nova tecnologia e o longo período de vida útil do alto-forno atrelado ao alto potencial já explorado da rota BF-BOF com lucratividade inviabilizam a utilização de novas tecnologias nesse cenário.

Já no cenário político, BF-BOF também possui maior pontuação dentre as três tecnologias, sendo beneficiada principalmente pelos critérios referentes à economia e sociedade & política. Já para o cenário ambiental, o HD-R é a tecnologia preferencial, com uma forte pontuação nos critérios referentes à ambiente e segurança & vulnerabilidade. O baixo potencial de emissão de CO₂ da tecnologia HD-R, além de menor impacto ambiental em relação as outras tecnologias empurram o resultado da rota por redução por hidrogênio.

5. Conclusões

No geral, obteve-se uma preferência para a rota BF-BOF nos cenários siderúrgico e político, enquanto a mesma perde a liderança para a tecnologia H-DR nos cenários padrão e ecológico. Muito mais do que a simples análise de preferência tecnológica em cada cenário, a análise como um todo pode ser interpretada como uma tendência, ou até mesmo necessidade, de uma economia de baixo carbono na indústria siderúrgica, uma das principais emissoras de GEE, ao passo que este mesmo avanço é desacelerado pelo enraizamento e forte inércia de todo o ecossistema siderúrgico já instalado, não só no Brasil, mas no mundo inteiro. Uma pontuação maior para a rota BF-BOF para os cenários político e siderúrgico demonstra fatores que tornam este tipo de processo ainda relevante no Brasil, ao passo que se pode interpretar dos cenários ambiental e padrão como uma tendência para a evolução da tecnologia.

Como limitações desse método de análise, em alguns momentos a análise dos critérios pode parecer um pouco redundante, como por exemplo em critérios como intensidade de intervenção e potencial de conservar a estrutura da indústria. Ademais, a principal limitação do presente método é através da análise quantitativa e qualitativa de modo a definir uma pontuação para certo critério que nem sempre

possui certo grau de clareza, se tornando subjetivo, e permitindo o leitor julgar uma pontuação diferente do autor. Para tanto, consultas na literatura são utilizadas quando disponíveis referentes ao tema do critério. A grande quantidade de literaturas consultadas no trabalho apesar de as vezes fornecerem informações sobre um mesmo tema, acabam possuindo certas disparidades também. A análise multicriterial é apenas uma das diversas formas de se analisar uma tomada de decisão ou um projeto e, apesar das informações presentes no trabalho basearem-se majoritariamente em informações de nível internacional, pontuações poderiam ser diferentes em quando baseadas em outras localidades e essas diversas informações poderiam auxiliar a uma melhor análise da atual situação internacional da indústria siderúrgica bem como seu futuro.

Para tal mudança, ainda são necessários altos investimentos em tecnologia e principalmente políticas de incentivo com forte viés ambiental. Em regiões como Europa e Japão, esta realidade com a economia de baixo carbono encontra-se em situação mais realista com programas como ULCOS, Hirsana e COURSE 50. De acordo com (DE PAULA, 2012), tais programas são de difícil implementação no Brasil, seja pelo seu grande volume financeiro (US\$ 725 milhões no caso do ULCOS e US\$ 315 milhões no do COURSE 50), seja pela capacitação tecnológica acumulada pela união através de *joint-ventures* e consórcios, no caso da ULCOS. Para um curto e médio prazo, mudanças pouco relevantes são esperadas na siderurgia brasileira principalmente no critério relacionado a meio ambiente. O setor siderúrgico brasileiro atualmente encontra-se em estágio avançado de maturidade e sua alta necessidade de capital de giro e de investimentos, somado à longa vida útil do alto forno, reforçam a opção pelas tecnologias e rotas tradicionais de produção de aço primário.

Dentro das possíveis mudanças que poderão incidir até 2060 na siderurgia brasileira estão a incrementação da aciaria elétrica, dando maior espaço para produção secundária de aço principalmente reciclado; otimização de processo das atuais tecnologias; ampliação aproveitamento de resíduos e políticas ambientais mais severas. Em adição, não apenas o H-DR é demonstrado como uma rota inovadora para um futuro promissor, como também faz parte de uma extensa gama

de medidas possíveis no intuito de mitigar as emissões de GEE relacionadas à indústria siderúrgica. Uma grande combinação de processos, matérias primas, fontes de energia e políticas de incentivo poderiam levar a diversas outras formas de lidar com a grande emissão de CO₂.

6. Referências Bibliográficas

- BNDES. Panoramas Setoriais – Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro: 2016.
- BNDES. Panoramas Setoriais 2030. Rio de Janeiro: 2018.
- CETESB. 1º Inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo. 2.ed. São Paulo, 2011
- Convaço. Disponível em <<https://convaco.com.br/reforma-alto-forno-1-e-regeneradores-1-2-e-3-usiminas-ipatinga/>>. Acesso em 15/10/2019
- SAATY, T.; Decision making with the analytic hierarchy process, 1977
- DE CARVALHO, A. Challenges & Opportunities for The Steel Industry In Moving Towards Green Growth. Seoul, 2010
- DE PAULA, G. M. Siderurgia. In: TONETO JR., Rudinei; PINHO, Marcelo (Org.). Economia de baixo carbono: impactos de novos marcos regulatórios e tecnologias sobre a economia brasileira. Ribeirão Preto: FUNPEC, 2015. p. 153–182.
- EUROFER – THE EUROPEAN STEEL ASSOCIATION – A Steel Roadmap for a Low Carbon Europe 2060
- FÓRUM BRASILEIRO DE MUDANÇA CLIMÁTICA. Proposta Inicial de Implementação da Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil. Brasília: 2018.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – The Future of Hydrogen, 2019
- PERICLEOUS, K.; DOH, Y.; DJAMBAZOV, G.; LEBON, B.; GARDIN, P.; CHAPELLE, P.; JARDY, A.; GAUTHIER, S.; Towards the development of a complete model of the BOF converter, 2011
- GLOBAL CCS INSTITUTE – Capture of CO₂ in the Steel Sector International Organization for Standardization, 2013. p. 14
- NUBER, D.; EICHBERGER, H.; ROLLINGER B. Circored Fine Ore Direct Reduction, 2006
- OTTO, A.; ROBINIUS, M.; GRUBE, T.; SCHIEBAHN, S.; Reducing CO₂ through the Integration of Renewable Energy and Hydrogen into the German Steel Industry, 2017

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO; CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO; BID – BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO. Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Siderúrgica no Estado de São Paulo de 2014 a 2030. São Paulo: 2018.

Åhmana, M.; Olssonb, O.; Vogla, V.; Nyqvistb, B.; Maltaisb, A.; Hydrogen Steelmaking for a Low Carbon Economy – STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE, 2018

ULCOS – ULTRA LOW CO2 STEELMAKING. Comissão Europeia. Disponível em: < <https://cordis.europa.eu/project/id/515960>>. Acesso em: 15/10/2019

WEIGEL, M.; FISCHEDICK, M; MARZINKOWSKI, J; WINZER, P; Multicriteria Analysis of Primary Steelmaking Technologies. Wuppertal, Alemanha: 2016

WEIGEL, M.; FISCHEDICK, M; MARZINKOWSKI, J; WINZER, P; Techno-Economic Evaluation of Innovative Steel Production Technologies. Wuppertal, Alemanha: 2016