

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ARTES, CIÊNCIAS E HUMANIDADES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SUSTENTABILIDADE

JHONATHAN FERNANDES TORRES DE SOUZA

**Um futuro de baixo carbono para os setores de aço e cimento no Brasil:
Avaliação intersetorial sob o olhar da economia circular**

São Paulo

2023

JHONATHAN FERNANDES TORRES DE SOUZA

**Um futuro de baixo carbono para os setores de aço e cimento no Brasil:
Avaliação intersetorial sob o olhar da economia circular**

Versão Corrigida

Tese apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade.

Área de concentração:

Sustentabilidade

Orientador:

Prof. Dr. Sérgio Almeida Pacca

São Paulo

2023

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.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Artes, Ciências e Humanidades,
com os dados inseridos pelo(a) autor(a)
Brenda Fontes Malheiros de Castro CRB 8-7012; Sandra Tokarevicz CRB 8-4936

Souza, Jhonathan Fernandes Torres de
Um futuro de baixo carbono para os setores de aço
e cimento no Brasil: avaliação intersetorial sob o
olhar da economia circular / Jhonathan Fernandes
Torres de Souza; orientador, Sérgio Almeida Pacca.
-- São Paulo, 2023.
117 p: il.

Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-
Graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes,
Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo,
2023.

Versão corrigida

1. Sustentabilidade. 2. Ecologia industrial. 3.
Mudança climática - Mitigação. 4. Metalurgia ferrosa -
Aspectos ambientais. 5. Aço - Reciclagem. 6.
Assimilação de carbono. I. Pacca, Sérgio Almeida,
orient. II. Título.

Nome: SOUZA, Jhonathan Fernandes Torres de

Título: Um futuro de baixo carbono para os setores de aço e cimento no Brasil: Avaliação intersectorial sob o olhar da economia circular

Tese apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade.

Aprovado em: 01/02/2023

Banca examinadora

Prof. Dr.:	Sérgio Almeida Pacca
Instituição:	EACH/USP
Julgamento:	Aprovado
Prof. Dr.:	André Felipe Simões
Instituição:	EACH/USP
Julgamento:	Aprovado
Prof. Dr.:	Marco Quattrone
Instituição:	Poli/USP
Julgamento:	Aprovado
Prof. Dr.:	Alexandre Salém Szklo
Instituição:	COPPE/UFRJ
Julgamento:	Aprovado
Prof. Dr.:	Vanderley Moacyr John
Instituição:	Poli/USP
Julgamento:	Aprovado

Dedico este trabalho de quatro anos aos meus amados pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois é a Rocha que me sustentou nesta jornada de quatro anos. Passei por todos os tipos de momentos, de formidáveis a terríveis, e sigo acreditando na Sua providência e sapiência. Deu-me um propósito e significou todas as minhas obras, incluindo a presente Tese.

À minha mãe Cleonice e ao meu pai Jailson, pois são o fundamento sem o qual não teria chegado até aqui. Não atribuo ao acaso, mas a um presente divino: ter pais que ofereceram amor incondicional, dedicação e apoio ao longo de toda a minha existência.

Ao meu orientador Sérgio Pacca pela orientação, ensinamentos, paciência, consideração, amizade e por todas as oportunidades abertas ao longo de quase uma década de parceria.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por apoiar a presente pesquisa através do Processo nº 2018/23439-1, vigente no período de 2019-2023.

À disposição da equipe do Instituto Aço Brasil, do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento e da Plataforma de Cenários Energéticos em enviar, por e-mail, dados primários fundamentais para a construção do modelo.

À professora Kátia Punhagui e ao professor Alexandre Szklo pela avaliação e recomendações realizadas no Exame de Qualificação, que ajudaram-me no aperfeiçoamento da pesquisa durante a segunda fase do doutorado. Igualmente aos professores André Felipe Simões, Marco Quattrone e Vanderley Moacyr John, pelos apontamentos que permitiram refinar a Tese em sua versão corrigida.

Ao professor Marcelo Lauretto (EACH), à professora Delhi Paivas (EACH) e ao professor Thiago Costa Soares (UFJF) pelos valiosos conselhos com relação à parte estatística e econométrica do modelo.

À querida Alessandra Giacomini e ao querido Celso Cachola, amigos perenais cultivadas ao longo de meu doutoramento, parte dos maiores ganhos que obtive nesta jornada.

Aos professores e colegas do Programa de Sustentabilidade da EACH/USP e de outros programas de Pós-graduação, no contexto das disciplinas que cursei e dos artigos publicados.

Aos amigos que mostraram impagável consideração e que forneceram uma boa companhia e suporte mental em vista dos árduos momentos da quarentena, em especial: Henrique, Stewart, Amanda e Abelardo.

Um agradecimento em memória de duas pessoas muito especiais: minha vó, Maria Torres (1932-2015), por todo o seu amor e cuidado para comigo, em um momento em que a vida era incerta e difícil, ela acreditou em mim; e o mestre Mario Yamashita (1943-2020), pelos

ensinamentos de uma vida saudável que geraram determinação e condição física, as quais me permitiram chegar até aqui.

A todas as demais pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para que a presente Tese fosse possível.

“[...] Mas ser menos mau é aceitar as coisas como elas são, é acreditar que sistemas pobremente desenhados, desonráveis e destrutíveis são o melhor que humanos podem fazer. Essa é a falha máxima do “ser menos mau”: uma falha de imaginação. Da nossa perspectiva, essa é uma visão depressiva de nosso papel enquanto espécie no mundo.

Que tal um modelo totalmente diferente? O que significaria ser 100% bom? ”

(MCDONOUGH; BRAUNGART, 2002, p. 67, tradução nossa)

RESUMO

SOUZA, Jhonathan Fernandes Torres de. **Um futuro de baixo carbono para os setores de aço e cimento no Brasil: Avaliação intersetorial sob o olhar da economia circular.** 2023. 117 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Versão corrigida.

As indústrias de aço e de cimento se destacam no contexto das mudanças climáticas globais. Elas estão entre os setores produtivos de maior intensidade energética e de difícil atingimento de emissões neutras (*net-zero*) em dióxido de carbono (CO₂), ao mesmo tempo em que apresentam crescimento acelerado, conforme o desenvolvimento de economias emergentes, como é o caso do Brasil. Embora, nos últimos anos, muitos cenários de redução de CO₂ tenham sido projetados, separadamente, para estes setores; observa-se ínfima quantidade de estudos que reúnam aço e cimento de forma combinada. Concomitantemente, a economia circular começou a ser recentemente incorporada em cenários de baixo carbono (BC), como forma de estender a análise em termos de cadeia produtiva, e permitir a identificação de novas oportunidades econômicas e ambientais. Diante do compromisso nacional no combate às mudanças climáticas, existe a necessidade de se descarbonizar a produção brasileira de aço e cimento, idealmente por meio de um trajeto de menor custo e que reflita as características técnico-econômicas destes setores no país. Neste contexto, a presente pesquisa teve por objetivo a construção de cenários BC, até 2050, integrando as indústrias de aço e cimento no Brasil sob a égide de cinco estratégias de economia circular. O modelo foi alicerçado em um conjunto de métodos que englobam, entre outros, a econometria, o custo marginal de abatimento (MAC) e o método de Monte Carlo para análise de incerteza. O cenário principal demonstra ser possível reduzir 2,7 GtCO₂e no período analisado, 52% das emissões no cenário de referência, por um MAC médio de US\$12/tCO₂, sem o uso de tecnologias disruptivas e incipientes no contexto brasileiro. A análise de cenários alternativos demonstrou como o potencial de redução e o MAC variam com diferentes pressupostos, e concluiu que a evolução da matriz elétrica nacional possui grande peso sobre os resultados do modelo. O trabalho fomentou a discussão, no âmbito da simbiose industrial, sobre a possibilidade de compartilhamento de créditos de carbono entre o setor de aço, o fornecedor de escória, e o setor de cimento, o qual utilizaria a escória como substituto do clínquer, ajudando na equalização de MAC entre os setores. Também houve discussões a respeito da projeção física de aço e cimento, dos limitantes e barreiras à implementação de cada estratégia, do uso de terra pela estratégia de alto-forno a carvão vegetal, que obteve o maior potencial avaliado, e a respeito das limitações e incertezas do modelo. Os resultados desta pesquisa podem auxiliar na implementação de uma indústria brasileira que concilie o desenvolvimento econômico com a mitigação das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Ecologia industrial. Mudança climática - Mitigação. Metalurgia ferrosa - Aspectos ambientais. Aço - Reciclagem. Assimilação de carbono.

ABSTRACT

SOUZA, Jhonathan Fernandes Torres de. **Low carbon future for steel and cement sectors in Brazil:** intersectorial assessment under the view of the circular economy. 2023. 117 p. Thesis (Doctor of Science) – Graduate Program in Sustainability, School of Arts, Sciences and Humanities, University of São Paulo, São Paulo, 2023. Revised version.

Steel and cement industries stand out in the field of climate change because they are among the most energy-carbon intensive and hard-to-abate manufacturing sectors. At the same time, they show high growth rates especially in emerging economies, as the Brazilian case. Although many CO₂ reduction scenarios have been individually made for these industries in the recent years, few studies that assemble them in the same model were retrieved from the literature. In the meantime, low carbon (LC) scenarios recently are incorporating the circular economy as a way to expand the analysis in terms of production chain and to identify new business and environmental opportunities. Given the national commitment to combat the global climate change, there is a need to decarbonize steel and cement production by a low-cost pathway, which is consonant with technological conditions in Brazil. Therefore, this research has forecasted LC scenarios until 2050, integrating Brazilian steel and cement industries, based on five circular economy strategies. The model utilized a set of methods as (e.g.) econometrics, marginal abatement cost (MAC), and the Monte Carlo method for uncertainties analysis. The main scenario shows that it is possible to avoid 2.7 giga metric tons of CO₂ equivalent (GtCO₂e) in the entire period, 52% of the BAU emissions, at an average cost of US\$12/tCO₂, without the use of disruptive and incipient technologies in Brazil. Through the alternative scenario analysis, the study shows how abatement potentials and costs vary under distinct assumptions, and it has concluded that the composition of the future national power generation is a very important assumption for the model outputs. Regarding the industrial symbiosis, the thesis discusses the possibility of sharing carbon credits between steel and cement, which uses slag (steel by-product) to replace clinker. This carbon trade would contribute to balance MAC among industries. Other issues discussed in this work were the steel and cement production forecast; the limits and barriers to implement each strategy; the land use by steelmaking biocharcoal, the largest potential strategy; and limitations and uncertainties in the model. Research findings can assist the implementation of a low carbon industry that harmonizes economic development with the climate change mitigation.

Keywords: Sustainability. Industrial ecology. Climate change - Mitigation. Ferrous metallurgy - Environmental aspects. Steel - Recycling. Carbon assimilation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Etapas de produção do aço.....	25
Figura 2- Etapas da produção de cimento (escopo <i>cradle-to-gate</i>).....	27
Figura 3- Publicações científicas indexadas a respeito do tema de pesquisa (12/12/2022)	28
Figura 4- Modelo intersetorial aço-cimento	35
Figura 5- Relação da produção e consumo mensais de cimento entre 2012 e 2020	38
Figura 6- Resultados das projeções para a demanda de aços planos (esquerda) e aços longos (direita)	40
Figura 7- Resultados das projeções para a produção de cimento	41
Figura 8- Evolução do comércio exterior do aço.....	42
Figura 9- Extração vs. Silvicultura na produção de carvão vegetal (2001-2019)	49
Figura 10- Representação do modelo linear versus circular na indústria de aço.....	51
Figura 11- Modelo de evolução das participações (<i>n</i>) das categorias de aço de 1970-2050 sem calibração (esquerda) e com calibração (direita)	54
Figura 12- Representação de modelo linear versus circular na indústria de cimento	59
Figura 13- Projeção do fator de emissão do SIN em diferentes cenários do setor elétrico brasileiro	66
Figura 14- Árvore de cenários alternativos	74
Figura 15- Projeções da produção de aço (esquerda) e de cimento (direita) 2020-2050 e faixa de variação conforme método de Monte Carlo.....	76
Figura 16- Redução da produção de cimento mediante desmaterialização na construção civil	77
Figura 17- Produção de aço por rota nos cenários BAU (esquerda) e BC (direita)	78
Figura 18- Evolução das emissões no cenário BAU e contribuição de cada estratégia de mitigação.....	79
Figura 19- Demanda final de energia no cenário BAU (esquerda) e no cenário BC (direita) no período de análise	81
Figura 20- MAC por estratégia e média do cenário BC mediante método de Monte Carlo	83
Figura 21- Discriminação dos custos (<i>breakdown cost</i>) da análise MAC.....	84
Figura 22- Efeitos da penetração do carvão vegetal sobre o potencial de mitigação (esquerda) e custos (direita) em um cenário sem o uso da escória ácida	85
Figura 23- Desempenho dos cenários alternativos sob método de Monte Carlo	87

Figura 24- Alocação dos créditos de carbono da substituição de clínquer pela ótica do implementador (esquerda) e pela ótica do fornecedor de adições (direita)	88
Figura 25- Sensibilidade do potencial total de mitigação mediante 10% de aumento nas variáveis de entrada	89
Figura 26- Variação do BES: prêmio sobre o aço <i>versus</i> taxa de atratividade.....	90
Figura 27- Variação do MAC mediante a taxa de desconto	91
Figura 28- Elasticidade do MAC da reciclagem (esquerda) e do coprocessamento (direita) ao preço dos insumos.....	92
Figura 29- Redução do potencial de mitigação do carvão vegetal conforme aumento do desmatamento	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Modelos de regressão para a demanda de aço	39
Tabela 2- Modelos de regressão para a produção de cimento	40
Tabela 3- Destino das exportações do aço (toneladas)	43
Tabela 4- Origem das importações do aço (toneladas).....	43
Tabela 5- Fatores de consumo específico de energia (GJ/t)	46
Tabela 6- Fatores de emissão para a produção de aço (tCO ₂ e/t)	46
Tabela 7- Fatores específicos para o setor de cimento	47
Tabela 8- Fatores de emissão dos materiais suplementares no cimento.....	48
Tabela 9- Penetração dos combustíveis alternativos na matriz energética do clínquer.....	63
Tabela 10- FE_i das fontes primárias de geração elétrica por tipo de abordagem	65
Tabela 11- Projeção dos preços da energia.....	69
Tabela 12- CAPEX e OPEX para as rotas tecnológicas de aço	70
Tabela 13- CAPEX para o setor de cimento.....	72
Tabela 14- OPEX para o setor de cimento	72
Tabela 15- Emissões e potencial de redução sob o método de Monte Carlo	80
Tabela 16- MAC das estratégias de baixo carbono na simulação principal	82
Tabela 17- Cenários alternativos sobre a simbiose industrial	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.a.	ao ano
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BAU	<i>Business-as-usual</i> = Cenário de referência
BC	Baixo Carbono
BECP	<i>Break-even carbon price</i> = Preço de equilíbrio de carbono
BEN	Balanco Energético Nacional
BES	<i>Break-even share</i> = Modelo de participação de equilíbrio
BF	<i>Blast Furnace</i> = Alto-forno
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i> = Captura e armazenamento de carbono
CDR	Combustível Derivado de Resíduo
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
EAF	<i>Electric Arc Furnace</i> = Forno elétrico a arco
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i> = Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FE	Fator de Emissão
FEE	Fator de Eficiência Energética
GCCA	<i>Global Cement and Concrete Association</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IAB	Instituto Brasileiro de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> = Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LEAP	<i>Long-range Energy Alternatives Planning model</i>
MAC	<i>Marginal Abatement Cost</i> = Custo Marginal de Abatimento
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
PEVS	Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura
PIB	Produto Interno Bruto
PNE	Plano Nacional de Energia
PPP	<i>Purchasing Power Parity</i> = Poder de paridade de compra
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SAAM	<i>Scrap Availability Assessment Model</i> = modelo de avaliação de disponibilidade de sucata
SATC	Associação Benéfica da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNIF	Sistema Nacional da Informações Florestais
SSP2	<i>Shared Socioeconomic Pathway 2</i>
TIR	Taxa Interna de Retorno
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
VPL	Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS QUÍMICOS E UNIDADES

CaCO ₃	carbonato de cálcio
CaO	óxido de cálcio
CO ₂	dióxido de carbono
CO _{2e}	dióxido de carbono equivalente
E	exa (10 ¹⁸)
Fe ₂ O ₃	óxido de ferro
G	giga (10 ⁹)
g	grama
h	hora
ha	hectare = 10.000 m ²
J	joule
k	quilo (10 ³)
M	mega (10 ⁶)
m ²	metro quadrado
m ³	metro cúbico (10 ³ litros)
°C	grau célsius
R ²	coeficiente de correlação
s	segundo
SiO ₂	óxido de silício
T	tera (10 ¹²)
t	tonelada
tep	tonelada equivalente de petróleo (41,84 GJ)
W	watt (J/s)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	PANORAMA DOS SETORES DE AÇO E CIMENTO NO BRASIL	19
1.2	ROTAS PRODUTIVAS DE AÇO E CIMENTO NO BRASIL	22
1.2.1	Rotas tecnológicas do aço	23
1.2.2	Rotas tecnológicas do cimento	26
1.3	REVISÃO DA LITERATURA (ESTADO DA ARTE)	28
1.3.1	Status da literatura científica	28
1.3.2	Integrando a economia circular como estratégia em cenários de baixo carbono	31
1.4	RELEVÂNCIA DO ESTUDO	33
2	OBJETIVOS	34
3	MÉTODOS	35
3.1	PROJEÇÃO PARA AS PRODUÇÕES DE AÇO E CIMENTO	36
3.1.1	Modelos econométricos	38
3.1.2	Análise do comércio exterior de aço	42
3.2	FATORES TECNOLÓGICOS E DETERMINAÇÃO DOS CENÁRIOS	44
3.2.1	Fatores de consumo de energia e de emissão de CO₂	44
3.2.2	Análise sobre as tendências da origem do carvão vegetal para a siderurgia	48
3.2.3	Setor de aço: Evolução das estratégias de baixo carbono até 2050	50
3.2.3.1	Reciclagem: Avaliação do estoque de sucata por meio do SAAM	53
3.2.3.2	Investigação sobre a disponibilidade de área e viabilidade econômica do carvão vegetal	55
3.2.3.3	Carvão Vegetal: proposição do modelo BES	56
3.2.4	Setor de cimento: Evolução das estratégias de baixo carbono até 2050	58
3.2.4.1	Eficiência material por meio da industrialização na construção civil	60
3.2.4.2	Aumento das adições no cimento: disponibilidade de escória e cinzas volantes	61
3.2.4.3	Aumento das adições no cimento: penetração da estratégia	62
3.2.4.4	Aumento da participação de combustíveis alternativos	63
3.3	SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL	64
3.4	ANÁLISE ECONÔMICA	67

3.4.1 CAPEX e OPEX para o setor de aço	70
3.4.2 CAPEX e OPEX para o setor de cimento	72
3.5 ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS ALTERNATIVOS	73
3.6 ANÁLISE DE INCERTEZA	75
4 RESULTADOS	76
4.1 CENÁRIO PRINCIPAL	76
4.1.1 Emissões de CO₂ e demanda energética	79
4.1.2 Análise econômica	81
4.2 CENÁRIOS ALTERNATIVOS SOBRE A SIMBIOSE INDUSTRIAL	84
4.3 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	89
5 DISCUSSÕES	94
5.1 SOBRE A EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO FÍSICA DE AÇO E CIMENTO	94
5.2 SOBRE RECICLAGEM VERSUS CARVÃO VEGETAL: POTENCIAIS, CUSTOS E LIMITANTES NA PRODUÇÃO DE AÇO	95
5.3 SOBRE A ABORDAGEM DA DEMANDA PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ DO CIMENTO	97
5.4 SOBRE A SIMBIOSE INDUSTRIAL E ALOCAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO ENTRE SETORES	99
5.5 SOBRE O CCS E AS BEST AVAILABLE TECHNOLOGIES	100
5.6 SOBRE AS LIMITAÇÕES E INCERTEZAS DA ANÁLISE COM RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
6 CONCLUSÕES	104
REFERÊNCIAS	107
APÊNDICE A- TERMOS DE BUSCA UTILIZADOS NA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	114
APÊNDICE B- DADOS PARA A REALIZAÇÃO DAS REGRESSÕES NOS MODELOS ECONOMETRICOS	115
APÊNDICE C- CONFIGURAÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA A ANÁLISE DE INCERTEZA SEGUNDO MÉTODO DE MONTE CARLO	116

1 INTRODUÇÃO

Desenvolvimento sustentável é um conceito holístico que recebeu várias definições ao longo das últimas três a quatro décadas, porém a definição mais citada tem sido aquela estabelecida, em 1987, no âmbito do Relatório Brundtland, intitulado “*Our Common Future*”, que afirma que desenvolvimento sustentável é aquele que satisfaz as necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade das gerações futuras em atender suas próprias necessidades (INTERNATIONAL INSTITUTE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2019).

Em sintonia com essa definição, mediante as inequívocas evidências da causalidade entre as emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE) e o aumento da temperatura média da superfície terrestre, reiteradas no mais recente relatório de avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (MASSON-DELMOTTE et al., 2021), pode-se afirmar que uma das maiores preocupações ambientais dos dias atuais, em nível global, tem sido encontrar caminhos para limitar as emissões de GEE nos diversos setores sem criar impedimentos ao desenvolvimento das sociedades.

Atenta-se para o atual dilema: questões de preocupação mundial, majoritariamente ligadas à desigualdade e extrema pobreza, serão comprovadamente agravadas pelo aquecimento global; entretanto, as mesmas questões não devem ser agravadas ou adiadas com o próprio combate ao aquecimento global (SOUZA, 2018). A complexidade se encontra no fator tempo, através da comparação entre os custos da ação às gerações presentes e os prejuízos da inação às gerações presentes e futuras. Em uma visão estritamente econômica, vários pesquisadores avaliam o custo social do carbono, como Nordhaus (2017), que estimou um valor global de US\$ 31 para cada tonelada de dióxido de carbono (CO₂) adicionada na atmosfera, em 2015. A discussão não se fixa, entretanto, a “custos presentes da mitigação *versus* custos futuros da não mitigação”, já que muito tem se avaliado sobre os ganhos econômicos do investimento em tecnologias de baixo carbono, o que gera atratividade sobretudo aos setores industriais.

É neste contexto que alguns setores industriais se destacam (mesmo havendo necessidade de um trabalho em conjunto inter-relacionando todos os setores), como é o caso das indústrias de aço e cimento: ao mesmo tempo em que a demanda por tais materiais é crescente e altamente associada ao desenvolvimento econômico e social, tais indústrias estão entre aquelas mais difíceis de se atingir a emissão líquida neutra (*net-zero*). Aço e cimento são responsáveis por mais da metade da lacuna de 2,8 GtCO₂, em 2030, existente entre as metas do Acordo de Paris

e o cenário *net-zero* da *International Energy Agency* para 2050, tornando-se, respectivamente, o primeiro e segundo maiores representantes industriais inerentes ao desafio de mitigação das mudanças climáticas (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021, p. 132).

Na expectativa de um reaquecimento da economia brasileira, é realista esperar um crescimento das emissões decorrentes de aço e de cimento em curto e médio prazo. Portanto, estratégias de mitigação destinadas a estes setores são indispensáveis como parte do esforço nacional de evitar que o aquecimento global avance, até o final do corrente Século XXI, além do limite de 1,5 °C acima do período pré-industrial.

Em relação ao citado limite de 1,5 °C, a maioria dos cenários apresentados pelo IPCC prevê o uso de tecnologias baseadas em captura e armazenamento de carbono, em inglês *Carbon Capture and Storage* (CCS), especialmente no cenário em que a economia global cresce e o padrão de vida intensivo em carbono continua, forçando a alta demanda por combustíveis (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2018, p. 19). Todavia, estudos têm demonstrado que é possível atingir uma mitigação substancial através de caminhos alternativos, postergando e moderando o uso de tecnologias incipientes e de alto custo como o CCS (VAN VUUREN et al., 2018). Melhorias na eficiência energética e o aumento da reciclagem do aço se mostram como exemplos de caminhos alternativos. Mas, o problema é que tais melhorias não têm sido uniformes ao redor do globo, e ainda há uma grande parte da indústria mundial baseada em extração de minério e uso de coque de carvão, sobretudo no caso de grandes produtores de aço, como a China (LI et al., 2019) e o Brasil (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2017).

Indo além das mudanças climáticas, os setores de cimento e de aço possuem um potencial relevante para a área de ecologia industrial, no âmbito da economia circular e da simbiose industrial. Tais conceitos estarão sendo aprofundados e relacionados aos setores de estudo nos próximos subitens.

1.1 PANORAMA DOS SETORES DE AÇO E CIMENTO NO BRASIL

Mundialmente, o aço é o material de construção e engenharia mais importante (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2020), visto sua variedade de aplicações encontradas nos mais diversos setores. Por sua vez, o concreto, cujo componente básico é o cimento, possui a segunda maior demanda, perdendo somente para a água, assim sendo o material artificial mais

consumido no planeta (GAGG, 2014). As demandas por aço e cimento estão associadas ao ritmo de desenvolvimento e a necessidade por ampliação de infraestruturas para as atividades econômicas, produção de bens de consumo, bem como por construção de novas habitações.

No Brasil, anteriormente à crise econômica de 2015, o consumo aparente de produtos siderúrgicos veio crescendo a uma taxa média de 3,5% ao ano (a.a.) desde 2000 (BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020). A demanda por cimento, após um período de estagnação que durou, aproximadamente, 22 anos (de 1980 até 2002), passou a crescer a uma taxa média de 7% a.a. até 2013 (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2013). Mais recentemente, a crise ocasionada pela pandemia de COVID-19 teve efeitos bastante variados para cada setor da economia, mas, apesar da queda de quase 5% no PIB per capita (WORLD BANK, 2021), os setores de aço e cimento não mostraram terem sido efetivamente afetados. O setor de cimento apresentou valores negativos de crescimento da produção nos meses de março, abril e maio de 2020, em relação aos mesmos meses em 2019, mas fechou dezembro com um crescimento de 14,1% (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2021). Já o setor de aço apresentou decréscimo em janeiro, quando ainda não havia sido decretada a quarentena, e de março a julho, porém também fechou dezembro positivamente com 20% (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021). Considerando o ano inteiro, o crescimento dos setores de cimento e aço foram respectivamente 12% e -3%.

Segundo a sexta edição das estimativas anuais de GEE no Brasil (BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, 2022), observando a última década, aço e cimento representaram, em média, 76% das emissões de CO₂ de todo o setor industrial. Em 2020, o setor de aço emitiu 48,1MtCO₂, e o setor de cimento emitiu 23,1MtCO₂. Esses são os valores contabilizados no setor de processos industriais e uso de produtos; porém, se forem incluídas as emissões contabilizadas no setor de energia, mas decorrentes das atividades de aço e cimento, os mesmos ampliariam suas emissões em 15% e 54%¹, respectivamente.

Olhando para a evolução das emissões, observa-se com base na Comunicação Nacional (BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, 2022), antes da crise econômica brasileira (2005-2015), uma taxa de aumento de 5,5% a.a. para cimento, mais que o dobro da taxa média da indústria de 2,2% a.a.; já o setor de aço aumentou em 1,1% a.a. Por

¹ Estimativa feita com base no Balanço Energético Nacional (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022a) e fatores de emissão do IPCC e MCTI (GÓMEZ et al., 2006; BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, 2022), pois a Comunicação Nacional não discrimina o cimento dos outros minerais não metálicos dentro do setor de energia.

outro lado, em período mais recente (2015-2020), foi o setor de aço que aumentou suas emissões de CO₂ acima da média da indústria (2,3% a.a. contra 1,0% a.a.), enquanto o setor de cimento reduziu suas emissões de CO₂ em 0,4% a.a. Entretanto, vale ressaltar que, em 2020, primeiro ano da Pandemia de COVID-19, o setor de cimento aumentou suas emissões de CO₂ em 11%, em relação a 2019, e o setor de aço reduziu em 4,6%. De todo o modo, pode-se atribuir essas variações nas emissões totais a fatores alheios da evolução tecnológica, visto que a intensidade de carbono desses setores não diminuiu nos anos recentes.

A intensidade de carbono do aço brasileiro é o reflexo da baixa participação da rota semi-integrada na produção total, sobretudo ao longo dos últimos anos. Essa é a rota tecnológica fundamentada na obtenção de aço através da reciclagem de sucata, em vez de redução por meio do coque de carvão (maiores detalhes no item 1.2). Em 2019, as semi-integradas representaram somente 15% da produção de aço bruto (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020a), enquanto que a média mundial foi de 30% (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2019); já os Estados Unidos chegaram a alcançar 70% (HITES, 2020). A predominância da rota integrada na produção de aço representa um prejuízo não somente em termos de mudanças climáticas, mas também prejuízo para o estabelecimento de uma economia baseada na circularidade do ferro e aço.

Quanto à indústria cimenteira, o Brasil tem se mostrado à frente em produção sustentável comparado à média mundial. Conforme os dados do *Global Cement and Concrete Association* (GCCA) (2020), observa-se uma menor participação de clínquer, principal responsável pelas emissões de CO₂ de processo e consumo de energia térmica no cimento brasileiro, em relação ao globo (70% contra 77%), bem como uma maior participação de biomassa na matriz de oferta de energia primária (15% contra 6%), considerando-se o ano de 2018. Não obstante, o Brasil, de modo geral, tem se estagnado em termos de melhorias (*retrofits* na indústria), com a intensidade de carbono flutuando, em média, em 581 kgCO₂ por tonelada de produtos cimentícios desde 2005, segundo os dados do GCCA (2020).

Para atingir o nível ideal de produção sustentável para as indústrias de aço e cimento no Brasil, é necessário estruturar um cenário no qual as participações das rotas menos poluentes já existentes sejam aumentadas substancialmente.

1.2 ROTAS PRODUTIVAS DE AÇO E CIMENTO NO BRASIL

Os processos produtivos de aço e de cimento são análogos, visto que é possível sintetizar as várias opções tecnológicas existentes em duas rotas.

A primeira rota, a rota integrada, engloba todas as etapas de transformação do minério de ferro ou do calcário até a obtenção do produto final, respectivamente, aço ou cimento. Devido à necessidade de redução dos minérios, a rota integrada confere para ambos os setores uma elevada emissão direta de CO₂ por processo e por consumo de energia térmica.

A segunda rota, comumente chamada de rota semi-integrada no caso do aço ou rota de moagem no caso do cimento, não possui a etapa de redução química, portanto as emissões totais são consideravelmente menores do que na rota integrada. Por outro lado, as emissões por consumo de eletricidade, enquadradas no escopo 2², acabam aumentando significativamente, em especial no caso de aço.

Como adendo, ressalta-se que qualquer transição tecnológica que reduza emissões diretas penalizando o consumo de eletricidade será vantajosa no contexto brasileiro porquanto a matriz elétrica, historicamente, caracterizar-se por um baixo fator de emissão (FE). Esse baixo fator, todavia, tem sido comprometido em episódios de crise hídrica, tais como as observadas em 2014, 2015 e, mais recentemente, 2021, nos quais ele excedeu 100gCO₂/kWh (BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÕES, 2022). A probabilidade de esses eventos climáticos extremos se tornarem mais frequentes e intensos é aumentada com o avanço das mudanças climáticas (MASSON-DELMOTTE et al., 2021).

Além da possibilidade de redução das emissões de CO₂, com a migração da primeira rota para a segunda em ambos os setores, também é possível reduzir as emissões com mudanças tecnológicas, dentro de cada rota, através de tecnologias substitutas ou incrementais. A seguir, as rotas são detalhadas para cada um dos setores.

² Conforme o Programa Brasileiro *GHG Protocol* (MONZONI, 2008, p. 26–28), existem 3 escopos de emissões para realização de inventários de GEE. O Escopo 1 refere-se a fontes pertencentes ou controladas pela empresa. Já o Escopo 2 se refere à energia elétrica ou térmica adquirida pela empresa. E, por fim, o Escopo 3 se refere às demais emissões de CO₂ indiretas, geralmente à montante de cadeia produtiva da empresa.

1.2.1 Rotas tecnológicas do aço

As três etapas básicas da produção de aço são a redução, o refino e a laminação. A rota integrada apresenta todas as etapas e utiliza majoritariamente o minério de ferro, enquanto a rota semi-integrada não possui a etapa de redução e trabalha principalmente com sucata de ferro, mas também pode usar uma parcela de ferro-gusa, advindo do alto-forno na rota integrada, ou de ferro-esponja, obtido por redução direta (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2017). Os processos são simplificados a seguir, a saber: sinterização e coqueificação, redução do minério de ferro, refino, e laminação do aço.

Sinterização e coqueificação são pré-etapas paralelas cujo objetivo é a preparação dos insumos para o alto-forno. A sinterização ou pelletização tratam o minério de ferro, aglomerando-o e uniformizando-o em sinter, pelotas ou granulados. A coqueificação é responsável por transformar o carvão mineral em coque de carvão. O coque é um combustível com maior concentração de carbono em relação ao carvão, e também os voláteis presentes no mineral são diminuídos. A maioria das usinas integradas no Brasil possuem coquearias, produzindo coque a partir de carvão mineral adquirido e aproveitando os gases residuais para os processos à jusante, deste modo, reduzindo o consumo líquido de energia (BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009). Parte das usinas não possui coquearias, pois adquirem coque de terceiros ou utilizam carvão vegetal como redutor.

A redução é a etapa que envolve a transformação do óxido de ferro (Fe_2O_3) em ferro-gusa, uma liga de ferro metálico com maior concentração de carbono (~3%). Isso ocorre dentro do alto-forno, ou *Blast Furnaces* (BF) do inglês, onde é introduzido o sinter, carvão vegetal ou o coque de carvão com uma parcela de finos de carvão. O aumento do uso de carvão mineral e coque em detrimento do vegetal ao longo da história do aço³ ocorreu principalmente por conta do aumento da capacidade dos altos-fornos e das limitações físicas, entre elas a friabilidade, do carvão vegetal. Mesmo que existam caminhos para a utilização de carvão vegetal em grandes altos-fornos, como a injeção pulverizada (GUPTA, 2010) ou em determinadas proporções na mistura do coque (SUOPAJÄRVI et al., 2017b), a maioria do carvão vegetal é consumida por

³ No caso brasileiro, as participações de carvão vegetal, coque metalúrgico e carvão mineral na matriz energética do aço foram, respectivamente, 32%, 36% e 0% em 1970. Esses valores passaram a ser, respectivamente, 19%, 42% e 14% em 2020 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022a).

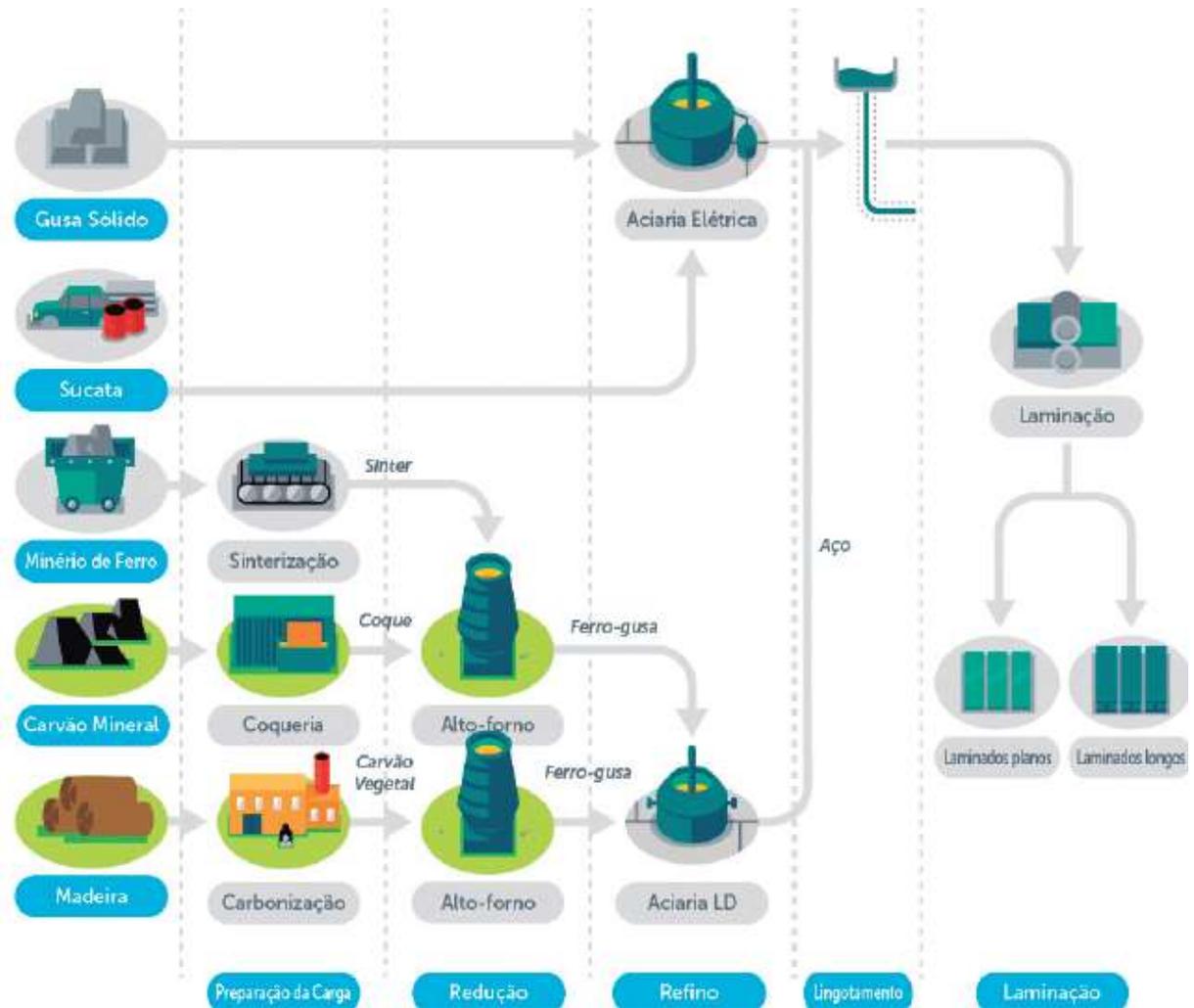
produtores independentes de ferro-gusa, os chamados “guseiros”, que no Brasil foram responsáveis por 66% da produção a carvão vegetal no ano de 2019 (SINDIFER, 2020).

O refino é a etapa que objetiva a obtenção do aço com as propriedades necessárias através da diminuição do teor de carbono (até 0,2%) e redução de outros elementos indesejáveis como o enxofre. Este processo ocorre nas aciarias, pela rota integrada, através de fornos chamados conversores a oxigênio, ou *Basic Oxygen Furnace* (BOF) do inglês. Pela rota semi-integrada, utilizam-se os fornos elétricos a arco, também chamados *Electric Arc Furnaces* (EAF). Apesar de poder gerar aço tanto com ferro-gusa como com sucata, a intensidade de energia e emissões são aumentadas quanto maior a proporção de ferro-gusa no insumo total do EAF (HASANBEIGI; JIANG; PRICE, 2014).

A laminação é a etapa final na qual o aço ganha forma nos mais variados produtos. Assim como na aciaria, recebe destaque o consumo de eletricidade e gás natural, além do consumo dos gases residuais (coqueria, alto-forno e aciaria) das fases anteriores (BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009).

A Figura 1 ilustra as etapas descritas anteriormente, demarcando as três rotas predominantes no Brasil: EAF, BF a coque de carvão e BF a carvão vegetal.

Figura 1- Etapas de produção do aço



Fonte: Confederação Nacional da Indústria e Instituto Aço Brasil (2017, p. 16).

Salienta-se que existem outras rotas tecnológicas além do BF/BOF e EAF, porém as participações de tais são ínfimas no parque brasileiro. Um exemplo dessas rotas é a redução direta do aço, que poderia ser uma tecnologia de baixo carbono se o redutor utilizado for o hidrogênio, preferencialmente originado de eletrólise da água (*green hydrogen*). Segundo os dados do *World Steel Association* (2018, p. 95), desde 2009 não há produção de aço por redução direta no Brasil.

1.2.2 Rotas tecnológicas do cimento

O cimento é constituído pela moagem de vários minerais. Os minerais utilizados e suas participações na mistura determinam o tipo de cimento.

O clínquer é o principal insumo no cimento e peça-chave no âmbito das emissões de carbono. Trata-se do produto da redução química, também chamada por calcinação, do carbonato de cálcio (CaCO_3) presente no calcário para óxido de cálcio (CaO). No Brasil, a emissão inerente ao processo de calcinação representa de 60% a 70% das emissões totais da produção de cimento, sendo a queima de combustíveis, principalmente o coque de petróleo, responsáveis pelo restante das emissões e cerca de 1% é correspondente ao uso de eletricidade (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2019).

Todos os tipos de cimento apresentam um determinado teor de clínquer, mas somente o Cimento Portland comum (CP-I) apresenta clínquer sem adições, somente com uma quantidade de sulfato, na forma de gipsita ou de gesso sintético, para controlar a cinética de hidratação do cimento (tempo de cura). O tipo CP-I praticamente não é mais produzido no Brasil, tendo apenas 1% de participação na produção de cimento total em 2014 (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2019). O cimento CP-II é o tipo mais produzido no Brasil e é caracterizado por materiais adicionados ao clínquer, são esses materiais: pozolana natural, argila calcinada, escória de alto-forno, cinzas volantes (da geração termelétrica) e *filler* de calcário. O último tem sido apontado como o substituto mais promissor para a redução das emissões de CO_2 do cimento (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2019). A adição de substitutos alteram as propriedades físico-químicas do cimento, a depender da dosagem e do tipo de aplicação, gerando tanto melhorias como limitações em relação ao cimento puro (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2019, p. 24).

Na indústria de cimento também existe a separação dos processos em via úmida e via seca. A via úmida praticamente não existe mais no Brasil, um dos fatores que confere maior eficiência energética e menores emissões em relação à média global, uma vez que a via úmida, por conta da necessidade de evaporação da água, consome o dobro de energia em relação à via seca (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2019).

A Figura 2 apresenta as etapas de produção do cimento até este estar pronto para o uso. Existe também a etapa, não incluída na Figura 2, referente à produção de concreto e de argamassa, os principais produtos de cimento, utilizados na construção civil. Sobre os processos e tecnologias que vão da porta da fábrica até o uso final, pode-se dizer que a diferença

fundamental é se a produção de concreto e argamassa ocorre *in-situ*, onde o desperdício de cimento acaba sendo maior, ou se tais produtos já vêm industrializados. Estudos anteriores (PUNHAGUI et al., 2018; REIS et al., 2021) já discutiram a questão da grande informalidade da construção civil no Brasil e como a migração do mercado para industrializados apresenta-se como um grande escopo para mitigação das emissões.

Figura 2- Etapas da produção de cimento (escopo *cradle-to-gate*)



Fonte: Adaptado e traduzido de *International Energy Agency* e *World Business Council for Sustainable Development* (2009).

1.3 REVISÃO DA LITERATURA (ESTADO DA ARTE)

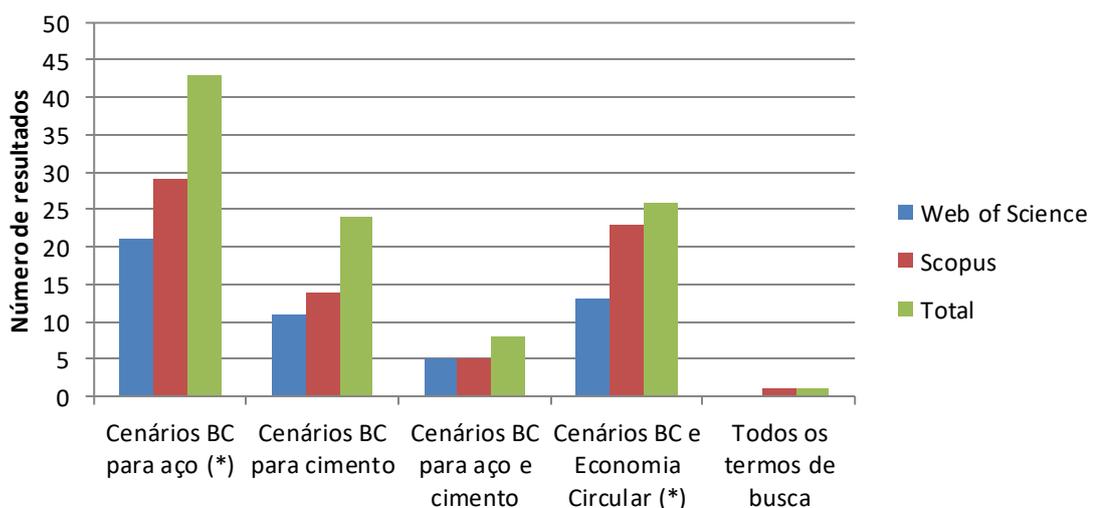
A seguir, os principais estudos que formam o embasamento teórico da presente pesquisa são apresentados.

1.3.1 Status da literatura científica

Esta subseção tem o propósito de apresentar uma análise bibliométrica simplificada para abordar os estudos precedentes desta tese, presentes na literatura científica, relacionados aos setores de aço e cimento, cenários BC e economia circular.

As buscas foram realizadas no dia 12 de dezembro de 2022 em duas das principais bases de literatura científica: *Web of Science* e *Scopus*. Os termos de busca podem ser conferidos no Apêndice A e os resultados estão apresentados na Figura 3. As colunas “Total” excluem os artigos repetidos entre as bases. Salienta-se que este exercício foi para fins de fornecer uma ilustração do que está publicado em literatura científica indexada, sendo que, por fatores variados, pode haver artigos que não foram resgatados com os termos de busca utilizados.

Figura 3- Publicações científicas indexadas a respeito do tema de pesquisa (12/12/2022)



Fonte: Elaboração própria.

(*) Inclui um artigo derivado da presente pesquisa (SOUZA; PACCA, 2021b), que não é discutido nesta tese.

Como observado na Figura 3, somente uma referência foi recuperada utilizando todos os termos de busca (HERBST; FLEITER; REHFELDT, 2018). Por se tratar de um trabalho de conferência, não houve acesso ao estudo na íntegra, porém seu resumo é comentado na próxima subseção (1.3.2).

Foram retornados 43 resultados para cenário de baixo carbono e aço. Dos estudos que efetivamente realizaram cenários futuros focados neste setor, alguns se apoiaram no *Long-range Energy Alternatives Planning* (LEAP) para conduzir suas avaliações (WANG et al., 2013; ATES, 2015). O LEAP é uma ferramenta que tem sido frequentemente utilizada para projetar cenários de demanda energética e emissões de CO₂; porém é focada no setor energético e, apesar de possibilitar análises integrando oferta e demanda por diversos setores econômicos, acaba dificultando a análise em escopos que incluem emissões de processos industriais e fluxos de material.

Encontrou-se uma variedade de países nos quais foram realizados estudos para o setor aço, diferente do setor de cimento, para o qual, dos 24 resultados recuperados, praticamente todos os estudos tiveram a China como recorte geográfico. Considerando todos os artigos para aço e os para cimento em ambas as bases, 25% deles apresentam CCS em seus resumos.

Em relação à busca por cenários de baixo carbono e economia circular, foram encontrados 26 artigos. Alguns se utilizam de Análise de Ciclo de Vida (ACV) para estimativa da pegada de carbono de produtos industriais (NEO et al., 2021; PAYET, 2021) e, embora apresentem alguma estimativa de emissões futuras de CO₂, não se focam na construção de cenários. Boa parte dos estudos avaliou o efeito de cenários de baixo carbono sobre a disponibilidade de recursos naturais, a exemplo o estudo de Boubault e Maïzi (2019), ou como estratégias de economia circular podem providenciar materiais críticos necessários para a transição de baixo carbono (KARALI; SHAH, 2022; VAN OORSCHOT et al., 2022). Poucos artigos integraram a economia circular como estratégia de redução de CO₂ em cenários de baixo carbono. São estudos recentes (a partir de 2018) e são comentados na próxima subseção (1.3.2).

Na busca por cenários para aço e cimento em conjunto, quatro principais artigos foram encontrados. O primeiro estudo, para a União Europeia, projetou cenários para o setor de aço e cimento, incluindo o setor elétrico e o de petróleo, e conclui que as metas de médio (2030) e longo prazo (2050) não poderiam ser atingidas com as tecnologias de redução de CO₂ disponíveis na data do estudo (ROOTZÉN; JOHNSON, 2013). O segundo estudo sugere que as projeções nacionais de redução de CO₂ firmadas no acordo de Paris são otimistas demais mediante as melhores práticas para aço e cimento e na ausência de preços globais de carbono (DENIS-RYAN; BATAILLE; JOTZO, 2016). Por outro lado, o terceiro estudo, para o setor

industrial do México, conclui que é possível reduzir 26,5% das emissões em 2030 com um cenário de baixo carbono, indo além da meta nacionalmente determinada de 19% (ISLAS-SAMPERIO; BIRLAIN-ESCALANTE; GRANDE-ACOSTA, 2020).

O quarto estudo também avaliou tecnologias de baixo carbono englobando aço e cimento, até 2045, na Suécia (KARLSSON; ROOTZÉN; JOHNSON, 2020). O destaque deste último estudo em relação aos anteriores é que houve maior integração entre os dois setores, já que, através de uma análise de cadeia e fluxo de materiais, aço e cimento são unidos em uma mesma trajetória conduzida pela demanda do setor de construção de estradas. Os mesmos autores conduziram um estudo semelhante para o setor de construção e edificações (KARLSSON et al., 2020). Estas abordagens, entretanto, não contemplaram a produção de cimento e aço em sua totalidade, já que existem outros usos finais para estes materiais (sobretudo aço) que não a construção civil.

Ressalta-se aqui que existem outros artigos indexados (além de relatórios técnicos) sobre o tema que, por diversos fatores, não foram retornados nas pesquisas da Figura 3. Este é o caso do artigo de van Ruijven et al. (2016), um dos principais estudos de baixo carbono que inspiraram o modelo da presente pesquisa por integrar as indústrias de aço e cimento, ao partir de um cenário econômico único⁴. Os autores desenvolveram um modelo *bottom-up* relativamente detalhado inserido em um modelo de avaliação global. A integração dos setores poderia, entretanto, ter ido além, quantificando a troca de fluxos entre aço e cimento e analisando possíveis sinergias através de estratégias para potencializar a redução total de CO₂.

Além disso, mesmo avaliando cenários baseados em um rol de tecnologias (em maior número para aço), algumas possibilidades promissoras para o Brasil não foram contempladas no trabalho de van Ruijven et al. (2016). O uso do carvão vegetal como energia renovável na produção de ferro-gusa é uma característica da siderurgia brasileira e pode ser uma contribuição significativa para um cenário de baixo carbono. Pinto, Szklo e Rathmann (2018) chegaram à conclusão de que, apesar de o potencial de mitigação de um cenário apenas baseado no carvão vegetal ser metade daquele de um cenário que inclui as melhores tecnologias disponíveis, do inglês, *Best Available Technologies* (BAT), o custo total acaba sendo 1.500 vezes menor do que o custo encontrado no cenário alternativo.

Outra possibilidade promissora, desta vez para o setor de cimento, é a eficiência material, que acabou sendo contemplada no estudo de Karlsson et al. (2020). Nos últimos anos, a

⁴ Denominado *Shared Socioeconomic Pathway 2* (SSP2), trata-se de um cenário cujas características socioeconômicas e políticas globais levam a desafios medianos tanto no que tange à mitigação quanto no que se refere à adaptação às mudanças climáticas.

eficiência material e a desmaterialização vêm sendo apontadas com um potencial de redução adicional bastante expressivo, sobretudo no setor de cimento. Pela transição da ótica da produção (*cradle-to-gate*) para a ótica do consumo (*cradle-to-use*), abre-se uma nova margem de redução de carbono ao se reduzir o volume de cimento utilizado na produção de concreto e argamassa. Um estudo para o cimento brasileiro (REIS et al., 2021) concluiu que aliar estratégias voltadas ao consumo com aquelas voltadas à produção pode aumentar o potencial de mitigação de 33% para 56% em relação ao cenário de referência, a um custo de abatimento próximo a zero. Resultados similares já tinham sido encontrados utilizando a mesma ótica a nível regional (PUNHAGUI et al., 2018).

Parte essencial das estratégias que têm sido incluídas na avaliação dos estudos emergentes supracitados (como a reciclagem, biomassa e eficiência material), e que permitem compor um cenário mais diversificado e de menor custo para alcance das metas climáticas, está diretamente relacionada ao conceito de economia circular.

1.3.2 Integrando a economia circular como estratégia em cenários de baixo carbono

A economia circular tem recebido um destaque crescente ao longo da última década: de 129 artigos publicados, em 2011, recuperados pelo termo “*circular economy*” na base *Scopus*, para 4.691 artigos em 2021.

Na presente pesquisa, adotou-se a definição de economia circular como sendo “uma economia industrial que é restauradora e regenerativa por intenção e design” já que é mais abrangente (LIEDER; RASHID, 2016) e, portanto, em princípio consegue compreender todas as estratégias propostas no estudo, que envolvem ciclos fechados e abertos, tanto na tecnosfera (cadeia produtiva) como no sistema atmosfera-biosfera (ciclo do carbono).

A economia circular é um conceito amplo com mais de cem definições, a maioria relacionada ao trinômio reduzir-reutilizar-reciclar (também conhecido por “3Rs”), porém com poucas ligações explícitas com o conceito de desenvolvimento sustentável (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017). Ela vem sendo bem aplicada do nível de produto ao nível setorial, mas tem raramente atingido o nível sistêmico (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018) ou mesmo enfatizado em suas definições a necessidade de uma mudança sistêmica (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017).

Desta forma, a avaliação integrada⁵ dos setores de aço e cimento baseada na reciclagem, uso de biomassa renovável, aproveitamento de coprodutos e eficiência material é uma investida inicial para incorporar a economia circular em nível sistêmico.

A economia circular já foi utilizada como estratégia de redução de CO₂ em cenários de baixo carbono por alguns autores recentemente.

Nazmul Islam et al. (2021) propuseram um cenário de estratégias nacionais baseadas em economia circular que conseguiria reduzir 75% das emissões de CO₂ do setor de alimentos em Bangladesh, até 2050. Nesse caso, a economia circular se referiu a estratégias como o reuso de alimentos, utilização de coprodutos, redução do desperdício de alimentos e reciclagem de nutrientes.

Herbst; Fleiter e Rehfeldt (2018) construíram cenários para a indústria da União Europeia que também incluiu medidas de eficiência material e elementos de economia circular. A análise de um amplo rol de medidas foi um contraponto ao *Roadmap* realizado em 2010 que se apoia principalmente no uso de CCS. O estudo concluiu que eficiência energética possui um grande potencial de mitigação, porém mudanças na estrutura produtiva para tecnologias inovadoras são necessárias, o que exige políticas mais incisivas para uma mudança radical em menos de 35 anos.

Fauré, Finnveden e Gunnarsson-Östling (2019) realizaram quatro *backcastings* para o alcance da meta de 1,5 °C na Suécia até 2050. A economia circular é apresentada como um dos *backcastings* e se apoia no amplo consumo de serviços, no aluguel de produtos e nos 3Rs. O estudo assume que a Suécia é zero em consumo de combustíveis fósseis, apenas contabilizando as emissões de processo. O setor de cimento é incluído como uma das quatro principais fontes desse tipo de emissão, porém não há colocação sobre o setor de aço nem uma avaliação do fluxo de coprodutos entre esses setores.

Similarmente, a estratégia de economia circular, representada pela eficiência material, foi apontada por Pauliuk et al. (2021) como um dos três pilares para descarbonização do setor de construção e de veículos de passageiros, juntamente com eficiência energética e oferta de energia de baixo carbono, em um cenário global podendo evitar até 78 GtCO₂ (somando os dois setores) até 2050. O estudo estima o impacto nos setores de aço e cimento com a redução na produção destes materiais, entretanto não tem por escopo a proposição de tecnologias mitigadoras voltadas para a fase de produção nesses setores.

⁵ Por “avaliação integrada”, entende-se como o estudo intersetorial que modelou a produção de aço e cimento sob um mesmo cenário de evolução do PIB, e que inclui os efeitos aditivos ou exclusivos que uma mudança em um setor gera em outro.

1.4 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

Os estudos supracitados refletem a tendência atual de incorporar a esfera de baixo carbono (que usualmente era tratada de forma reducionista) com a esfera da economia circular. Estudos que agregam estas duas esferas tendem a ampliar o escopo da cadeia produtiva, analisar impactos além da categoria de emissão de CO₂, como a depleção de recursos, identificar novas oportunidades de geração econômica e diversificar as opções de mitigação; mesmo que a aplicação de tecnologias radicais como o CCS continue sendo necessária para atingir as metas climáticas de longo prazo (VAN VUUREN et al., 2018).

Mesmo assim, tais análises continuam sendo pontuais geograficamente e setorialmente, existindo muitos aspectos a serem explorados nesta área, sobretudo levando em conta a realidade brasileira e suas características ainda pouco abordadas por estudos do gênero.

Ainda existem poucos estudos que projetem cenários com vários setores de forma integrada ou que se aprofundem nos efeitos que uma variável de determinado setor possui sobre os demais. O presente estudo buscou avaliar essas inter-relações através dos fluxos entre aço e cimento com a abordagem da economia circular e da simbiose industrial.

A simbiose industrial é um ramo da ecologia industrial, caracterizada pela conexão entre dois ou mais setores industriais independentes para gerar benefícios mútuos em termos econômicos e ambientais. Ela é reconhecida como uma abordagem prática para promover a economia circular, sendo referida no pacote de políticas de economia circular da União Europeia como um meio de aumentar a circularidade de processos, bem como um tema chave para inovação, investimentos e horizontalidade de estratégias (DOMENECH et al., 2019). Neste estudo, a simbiose industrial é representada pela estratégia de substituição de clínquer, explorada nas subseções 3.2.4.2, 3.2.4.3 e 4.2.

Por fim, cabe-se ressaltar a importância da análise de custo-efetividade como tentativa de incorporar a variável econômica e engajar o interesse de tomadores de decisão e *stakeholders* no investimento em economia circular, uma vez que grande parte dos estudos tem se focado somente no aspecto ambiental (LIEDER; RASHID, 2016), o que põe em xeque a efetiva implementação da economia circular.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa foi a construção e avaliação de cenários de baixo carbono para as indústrias do aço e do cimento no Brasil sob a perspectiva da economia circular, através de um modelo intersetorial com horizonte temporal até 2050.

Trata-se de uma análise exploratória, cujos objetivos específicos almejam:

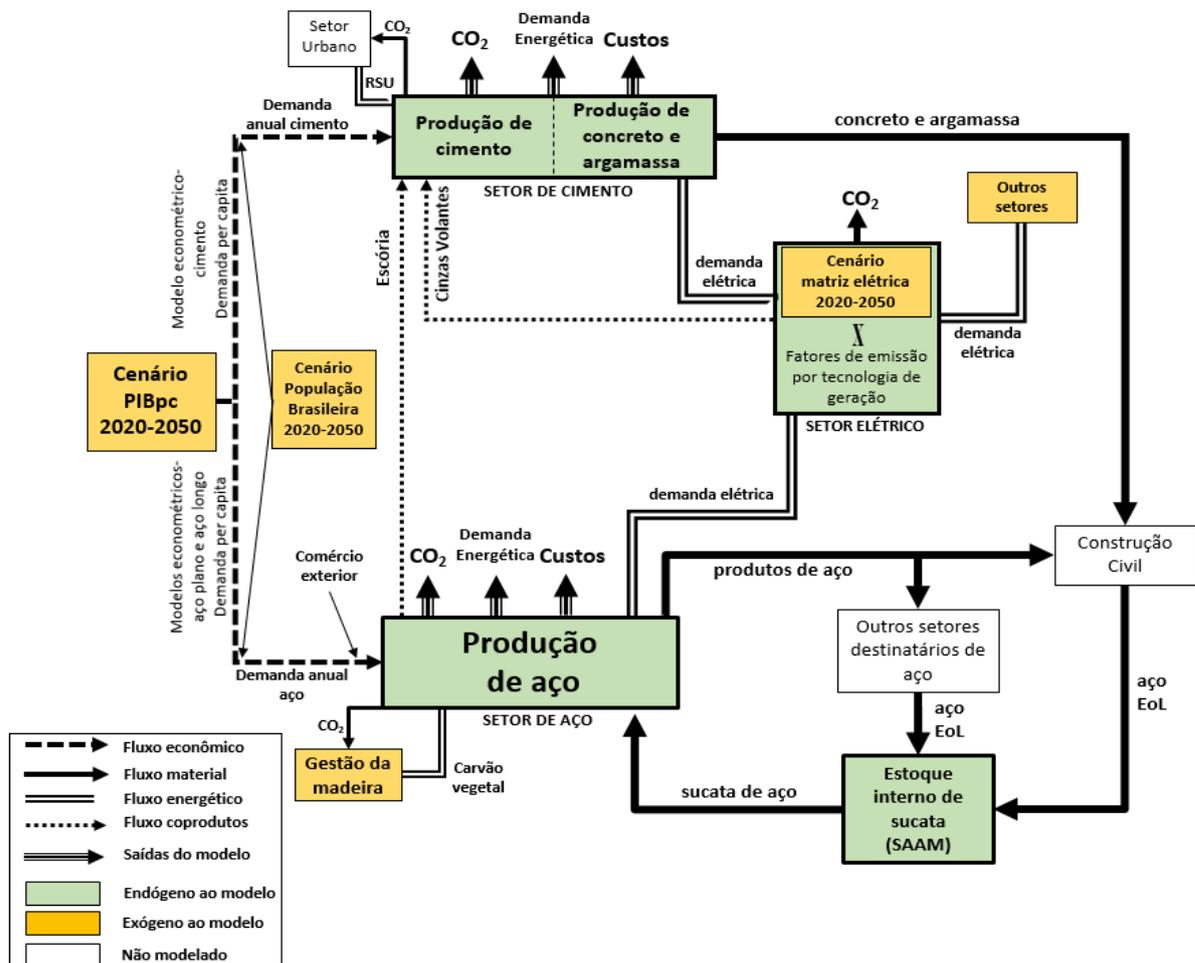
- a) avaliar o potencial de redução de GEE dos cenários propostos e os custos adicionais (ou reduzidos), associados a esses cenários, para os setores estudados;
- b) investigar como as interações entre estratégias afetam as saídas do modelo, no âmbito da integração intersetorial;
- c) testar a hipótese de que um cenário de maximização da simbiose industrial (geração e aproveitamento de escória e cinzas volantes) conduz ao mínimo nível de emissão de CO₂ e ao mínimo custo médio de abatimento.

3 MÉTODOS

A metodologia da pesquisa foi dividida em seis partes, a saber: (i) projeção econométrica das produções de aço e cimento no Brasil até 2050; (ii) composição dos parques produtivos de aço e cimento e determinação do cenário de referência, também chamado *business-as-usual* (BAU), e do cenário de baixo carbono (BC); (iii) projeção da matriz elétrica brasileira até 2050; (iv) análise econômica das estratégias propostas; (v) construção de cenários alternativos relacionados à simbiose industrial; e (vi) análise de incerteza.

A simulação principal, que será apontada ao longo desta tese, refere-se aos resultados do modelo com os dados de entrada tais como apresentados neste capítulo, ou seja, sem a aplicação do método de Monte Carlo. O quadro metodológico geral da pesquisa é apresentado na Figura 4.

Figura 4- Modelo intersetorial aço-cimento



Fonte: Elaboração própria

Em relação ao volume de controle do sistema analisado, o foco do estudo são emissões geradas diretamente da produção, dentro dos limites das fábricas, porém também foram incluídas as emissões, do Escopo 2, decorrentes do setor elétrico pelo consumo de eletricidade para produção de aço e cimento (item 3.3). Para uma comparação mais adequada entre as rotas de aço a coque e a carvão vegetal, as emissões de transporte dos mesmos também foram consideradas. Na fase de produção de concreto e argamassa, são consideradas apenas as emissões embutidas no cimento e nos materiais suplementares consumidos, juntamente com as do consumo de eletricidade pelo misturador planetário no cenário BC.

Não foram analisadas tecnologias de maior eficiência energética para aço e cimento ou mesmo outros tipos de BAT ou rotas tecnológicas que não estão atualmente difundidas no Brasil. Na fase de uso, não foram consideradas a substituição de aço e cimento por outros materiais como madeira, plásticos termorrígidos, etc.

A análise compreende uma visão sistêmica através da construção de um modelo intersetorial para aço e cimento, primeiramente, pelos setores terem suas demandas originadas de um mesmo cenário de evolução do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro até 2050, segundo, porque os fluxos de troca entre os setores também foram mensurados. A escória é um dos subprodutos do setor de aço que pode ser utilizado como insumo no setor de cimento, reduzindo as emissões provenientes do clínquer. Os rejeitos da construção civil, setor que demanda tanto cimento como aço, entram na conta do estoque de sucata disponível para reciclagem no setor de aço.

Por conta de a simbiose industrial ser uma das bases da interação entre setores, a alocação das emissões de CO₂e, também, dos potenciais de abatimento para cada setor é alvo de discussão nesta tese.

3.1 PROJEÇÃO PARA AS PRODUÇÕES DE AÇO E CIMENTO

A projeção da produção física dos setores foi o ponto de partida da modelagem dos cenários nesta pesquisa. A maior parte das estimativas da demanda futura por materiais e energia tem sido realizada através de modelos de regressão entre demanda e PIB per capita, também chamados de modelos econométricos.

Por via de regra, essa relação não é considerada linear, com a demanda per capita chegando a um ponto de saturação quando a economia atinge determinado nível de PIB per

capita. Estima-se que o ponto e o valor de saturação não são fixos de país para país, de modo que estudos têm analisado tal comportamento entre economias, em diferentes estágios de desenvolvimento, por meio de modelos de regressão com dados em painel, nos quais a variável dependente e as independentes são observadas tanto ao longo do tempo quanto entre países (DÖHRN; KRÄTSCHELL, 2014; WÅRELL, 2014). Esses mesmos estudos, através da análise em painel, concluem que outras variáveis independentes além do PIB são relevantes para aumentar o desempenho dos modelos.

Para que a curva apresente a forma de “U invertido”, concordando com o pressuposto da saturação da demanda, as regressões são comumente realizadas em função do PIB e do PIB ao quadrado. Nesse binômio, o PIB deve apresentar coeficiente positivo, enquanto o PIB ao quadrado deve apresentar um coeficiente negativo, para gerar a curva em “U invertido”. O ponto de saturação pode ser encontrado onde a derivada de PIB menos à derivada de PIB ao quadrado for igual a zero. Outro caminho foi tomado, a exemplo, no estudo de van Ruijven *et al.* (2016), no qual se testaram modelos de regressão logarítmicas e não-lineares que também atingem ponto de saturação. Apesar da variedade de modelos avaliada, somente o PIB esteve presente como variável independente⁶.

De fato, modelos de demanda-PIB acabam por serem vantajosos por sua simplicidade (WÅRELL, 2014), já que tais variáveis são disponibilizadas por várias instituições e, por isso, a maioria das pesquisas acaba por se apoiar apenas nelas. Outras variáveis que podem ter relação com a demanda de aço e cimento, como, por exemplo, a parcela do PIB destinada a investimentos em infraestrutura, são difíceis de serem obtidas na forma de série histórica, para determinação dos coeficientes de regressão, sendo ainda mais difícil a existência de projeções confiáveis delas para utilizar como entrada no modelo, na etapa de projeção da demanda.

No presente modelo, considerou-se que a mudança do perfil etário da população brasileira afetaria a demanda de aço e cimento até 2050. As estimativas e projeções da população brasileira por faixa de idade é disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Esses dados, juntamente com o PIB e os efeitos do tempo foram estudados para realizar as projeções de aço e cimento, como detalhado na próxima subseção.

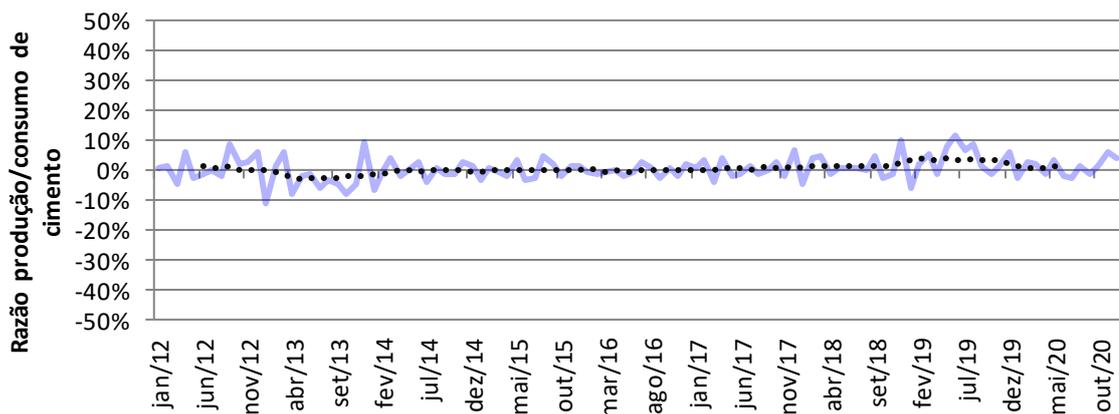
⁶ A mesma abordagem de van Ruijven *et al.* (2016) foi testada na presente pesquisa, entretanto, para ambos os setores, todos os modelos apresentaram baixo desempenho nos testes estatísticos ($R^2 < 0,65$).

3.1.1 Modelos econométricos

Foram testados cinco modelos de regressão linear múltipla pela combinação de três categorias de variáveis independentes. A primeira categoria é representada pelo PIB per capita e PIB per capita ao quadrado. Para os modelos que não apresentaram coeficientes negativos para PIB per capita ao quadrado, a regressão foi refeita utilizando somente PIB per capita. A segunda categoria busca incorporar algum efeito que esteja relacionado ao passar do tempo, como um possível aumento da eficiência no uso de aço e cimento. Determinou-se o ano de 2000 como marco zero para esta variável. A última categoria trata da participação percentual das faixas etárias na população total brasileira. Foram consideradas três faixas etárias conforme categoriza o IBGE: 0 a 14 anos, de 15 a 64 anos e mais de 65 anos.

As variáveis dependentes foram a demanda de aço e a produção de cimento em quilogramas por habitante (kg/hab). A demanda é condutora da produção física, entretanto a regressão foi realizada diretamente sobre a produção de cimento já que, nesse caso, a diferença entre demanda e produção é pouco relevante, variando em torno de 0,4% no período de 2012 a 2020, como pode ser visto na Figura 5. Esse aspecto é diferente no caso do aço, conforme apresentado na próxima subseção.

Figura 5- Relação da produção e consumo mensais de cimento entre 2012 e 2020



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2021).

Nota: A linha sólida representa dados mensais e a linha pontilhada representa a média móvel de 12 meses.

As séries históricas de demanda e produção total foram extraídas dos anuários estatísticos do Instituto Aço Brasil (2021) para aço de 2000 a 2020 e do Sindicato Nacional da Indústria de

Cimento (2021) para cimento de 1990 a 2020, conforme disponibilidade das séries. Por conta da diversidade de aplicações do aço, dividiram-se os valores totais nas categorias “planos” e “longos”, pressupondo que a influência das variáveis preditoras é diferente para cada um.

Os valores totais foram divididos pela população brasileira, dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2019), para estimar os valores per capita. Os mesmos dados, apresentados por faixa etária, foram utilizados para preparo das variáveis preditoras. A série histórica do PIB per capita foi tomada do Banco Mundial (WORLD BANK, 2021). O PIB se apresenta como dólares em poder de paridade de compra, do inglês *Purchasing Power Parity* (PPP), constante ao ano de 2017. O uso da paridade de compra em detrimento da taxa de câmbio ocorre por conta do primeiro não ser influenciado pela desvalorização das moedas (DÖHRN; KRÄTSCHELL, 2014).

Os dados utilizados nas regressões podem ser encontrados no Apêndice B. Os testes de desempenho (R^2 e R^2 ajustado), a interseção e os coeficientes de regressão para cada um dos cinco modelos podem ser observados na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1- Modelos de regressão para a demanda de aço

Aços Planos					
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
R²	0,808	0,760	0,712	0,712	0,323
R² ajustado	0,677	0,637	0,661	0,679	0,287
Interseção	-989,0	-793,1	-8,9	-16,4	9,7
PIB per capita	0,0250	0,0540	0,0086	0,0088	0,0039
PIB ² per capita	-3,66E-07	-1,41E-06	n.a.	n.a.	n.a.
ano (partindo de 2000)	8,0	n.a.	0,3	n.a.	n.a.
Percentual 0-14 anos	2.331	1.212	n.a.	n.a.	n.a.
Percentual 15-64 anos	171	-	n.a.	n.a.	n.a.
Percentual mais de 65 anos	-	1.130	-695	-583	n.a.
Aços Longos					
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
R²	0,898	0,874	0,817	0,802	0,495
R² ajustado	0,810	0,780	0,785	0,780	0,469
Interseção	-166,3	-492,7	-69,4	-27,0	-8,6
PIB per capita	0,013	0,021	0,008	0,007	0,004
PIB ² per capita	n.a.	-3,24E-07	n.a.	n.a.	n.a.
ano (partindo de 2000)	4,2	n.a.	-1,8	n.a.	n.a.
Percentual 0-14 anos	1.127	954	n.a.	n.a.	n.a.
Percentual 15-64 anos	-421	-	n.a.	n.a.	n.a.
Percentual mais de 65 anos	-	981	224	-411	n.a.

Fonte: Elaboração própria.

Nota: n.a.= não se aplica.

Tabela 2- Modelos de regressão para a produção de cimento

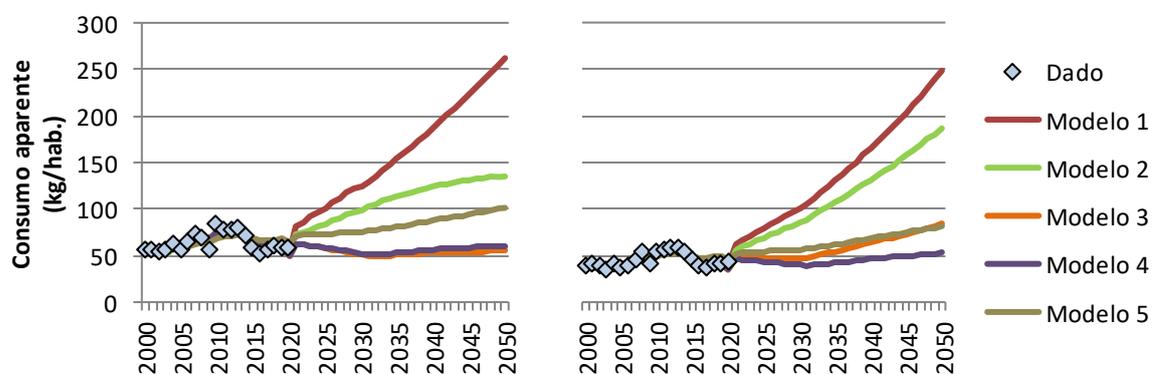
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
R²	0,856	0,856	0,855	0,855	0,825
R² ajustado	0,795	0,802	0,839	0,845	0,818
Interseção	421,6	-222,1	-179,8	-153,9	-112,4
PIB per capita	0,0396	0,0382	0,0378	0,0365	0,0279
PIB ² per capita	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
ano (partindo de 2000)	3,8	n.a.	-0,6	n.a.	n.a.
0-14 anos	0	130	n.a.	n.a.	n.a.
15-64 anos	-872	0	n.a.	n.a.	n.a.
mais de 65 anos	-2.014	-933	-915	-1.101	n.a.

Fonte: Elaboração própria.

Nota: n.a.= não se aplica.

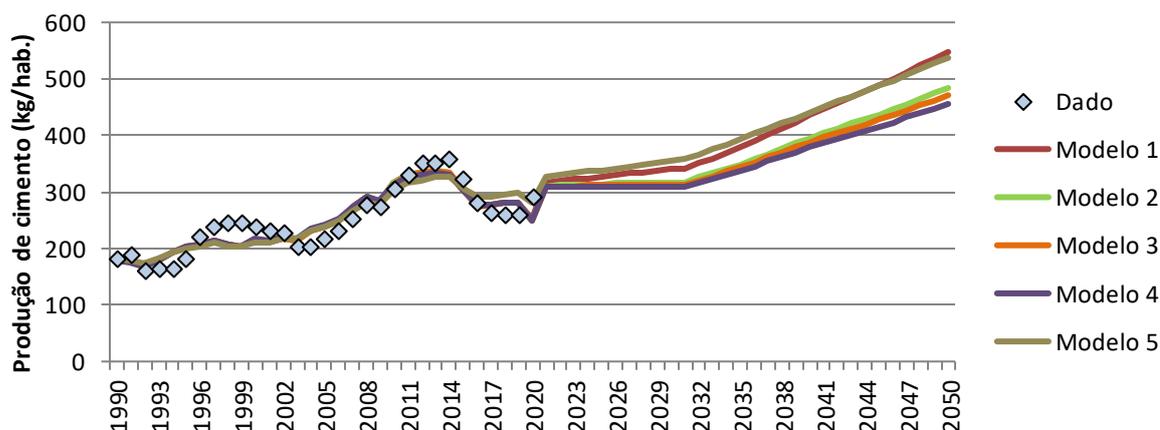
As projeções sob cada modelo podem ser observadas na Figura 6 para aço e, na Figura 7, para cimento. Como entrada das equações, foram utilizados a projeção da população brasileira por faixa etária até 2050 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2018) e os valores estimados de PIB *per capita* advindos do cenário econômico inferior apresentado pelo Plano Energético Nacional (PNE) 2050 (BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018). Além disso, os valores do PNE foram ajustados de PPP-2015 para PPP-2017 com base na razão entre o valor de 2015 do PNE, US\$ 15.700 per capita (BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018), sobre o valor do Banco Mundial no mesmo ano, US\$ 15.064 per capita (WORLD BANK, 2021).

Figura 6- Resultados das projeções para a demanda de aços planos (esquerda) e aços longos (direita)



Fonte: Elaboração própria.

Figura 7- Resultados das projeções para a produção de cimento



Fonte: Elaboração própria.

A eleição dos modelos de regressão observou tanto os testes de desempenho, os coeficientes, como também os resultados simulados até 2050.

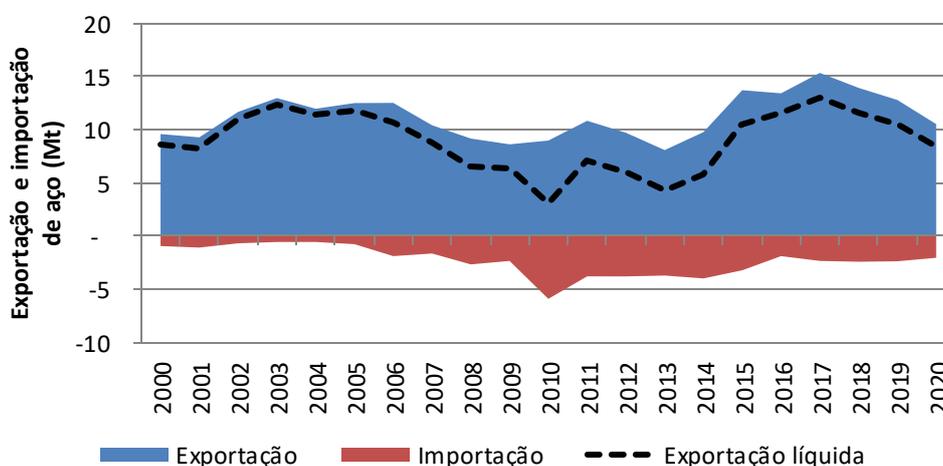
No caso de aço, para ambos os tipos de aço, o Modelo 5 (somente PIB) apresentou baixo desempenho comparado aos demais modelos. Para aços longos, o Modelo 1 (todas as variáveis) apresentou o maior desempenho tanto com R^2 como com R^2 ajustado, que busca ponderar se o aumento da correlação pela adição de mais variáveis preditoras é relevante ou é dado ao acaso. Para aços planos, o Modelo 1 também apresentou o maior R^2 , porém seu R^2 ajustado, é ligeiramente inferior ao do Modelo 4 (vide Tabela 1). Mesmo assim, o Modelo 1 foi eleito para projetar a demanda de aços planos, pois o Modelo 4 resulta em uma demanda per capita muito baixa em 2050, como visto na Figura 6. Observa-se que no Modelo 1, o coeficiente da faixa de idade acima de 65 anos é zero, o que ocorre possivelmente por conta da redundância que essa variável possui com as demais faixas etárias. De todo modo, a faixa de 0-14 anos apresenta coeficiente positivo como esperado, pois existe lógica em que a demanda por aço tenha uma relação direta com essa faixa etária. A variável tempo, por outro lado, apresentou coeficiente positivo, o que pode indicar que algum fator relacionado ao tempo, como mudanças no padrão de consumo, tem maior peso do que um possível aumento de eficiência do consumo de aço.

Para cimento, todos os modelos apresentaram valores de desempenho próximos e relativamente altos. Optou-se pelo Modelo 4, pois apresenta o maior R^2 ajustado (0,845). Observa-se que na projeção para 2050, os modelos 2, 3 e 4 apresentam curvas muito próximas.

3.1.2 Análise do comércio exterior de aço

Diferentemente do setor de cimento, o setor de aço apresenta uma relevante participação no comércio internacional, aliás, as exportações diretas⁷ estão consideravelmente acima das importações diretas, fazendo com que a produção total seja maior que o consumo aparente, que denota o resultado líquido, considerando produção, exportação, importação e variação nos estoques. A evolução de 2000 a 2020 pode ser vista na Figura 8.

Figura 8- Evolução do comércio exterior do aço



Fonte: Elaboração própria com base nos anuários estatísticos do Instituto Aço Brasil (2021).

Nota: Importação é representada no gráfico por valores negativos.

A Tabela 3 apresenta os principais países destinatários das exportações do aço brasileiro e a Tabela 4 apresenta os principais países de origem das importações do aço, para os anos de 2009, 2015 e 2020.

Observa-se que os EUA foi o principal importador do aço brasileiro em 2015 e 2020, já a China foi a principal origem do aço importado pelo Brasil nos anos apresentados. A massa de aço importada da China caiu basicamente pela metade de 2015 a 2020.

⁷ Aqui, foram analisados somente os fluxos de importação e exportação de produtos de aço (ex. bobinas, tarugos) e não o aço incorporado em bens de consumo final (ex. automóveis, maquinários).

Tabela 3- Destino das exportações do aço (toneladas)

	2009		2015		2020	
Total Geral	8.633.038	Total Geral	13.725.843	Total Geral	10.537.925	
Total Top 20	7.284.425	Total Top 20	12.325.666	Total Top 20	9.962.016	
Total Top 10	5.655.827	Total Top 10	10.119.517	Total Top 10	8.707.459	
Coréia do Sul	942.943	EUA	5.561.086	EUA	4.623.348	
China	940.154	Turquia	1.023.864	China	1.432.849	
Estados Unidos	683.577	Alemanha	720.542	Canadá	658.852	
Indonésia	647.886	Argentina	632.892	Argentina	385.573	
Formosa	483.296	Indonésia	613.112	Turquia	372.791	
Tailândia	463.212	Bélgica	345.888	Peru	305.996	
Argentina	437.126	México	334.187	México	256.813	
Índia	389.810	Colômbia	328.767	Colômbia	254.336	
Peru	375.084	Índia	286.691	Chile	215.610	
Colômbia	292.739	França	272.488	Rep. Dominicana	201.291	

Fonte: Elaboração própria com base nos anuários estatísticos do Instituto Aço Brasil (2021).

Tabela 4- Origem das importações do aço (toneladas)

	2009		2015		2020	
Total Geral	2.331.752	Total Geral	3.209.702	Total Geral	2.037.338	
Total Top 20	2.079.040	Total Top 20	3.038.687	Total Top 20	1.896.927	
Total Top 10	1.524.940	Total Top 10	2.725.013	Total Top 10	1.643.149	
China	422.225	China	1.611.886	China	883.976	
Coréia do Sul	225.093	Japão	216.232	Coréia do Sul	183.793	
Turquia	146.190	Turquia	199.467	Japão	142.478	
Rússia	118.931	Coréia do Sul	158.017	Rússia	131.155	
EUA	118.388	Rússia	129.430	Alemanha	64.821	
Japão	110.957	Áustria	124.472	Índia	61.248	
México	109.482	Alemanha	110.402	Itália	48.518	
Áustria	100.857	EUA	63.008	Argentina	46.159	
Ucrânia	89.389	Espanha	58.291	Suécia	43.748	
Venezuela	83.428	Argentina	53.808	Espanha	37.253	

Fonte: Elaboração própria com base nos anuários estatísticos do Instituto Aço Brasil (2021).

Dado a dificuldade de se estabelecer algum padrão ou método para previsão do comércio exterior até 2050, decidiu-se por adotar a média das exportações (11,2 Mt) e das importações (2,3 Mt) no período de 2000 a 2020. A incerteza sobre o comércio exterior foi analisada através do método de Monte Carlo (vide subseção 3.6), com as exportações e importações variando anualmente de forma aleatória dentro de uma distribuição normal de probabilidade.

3.2 FATORES TECNOLÓGICOS E DETERMINAÇÃO DOS CENÁRIOS

A seguir, são apresentados os principais dados e premissas utilizados na construção dos cenários BAU e BC, na penetração de cada cenário e no cálculo do consumo de energia e emissões de CO₂.

3.2.1 Fatores de consumo de energia e de emissão de CO₂

Os fatores utilizados para calcular o consumo de energia e emissões de CO₂ até 2050 foram determinados observando referências técnicas nacionais e internacionais, acompanhadas pelo Balanço Energético Nacional (BEN).

Para o setor de aço, a principal referência para os fatores de consumo de energia foi um estudo de eficiência energética realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para segmentos industriais selecionados (PINZÓN et al., 2018). As amostras industriais de aço utilizadas nesse estudo tiveram por ano base 2015.

No presente modelo, considerou-se a energia primária para calcular o consumo de energia e emissões, isto é, a produção e o consumo de gás de coqueria, de alto-forno e de aciaria, bem como de coque de carvão estão embutidos no consumo de carvão mineral e vegetal. No caso do consumo de eletricidade, foi considerado o consumo líquido (consumo menos geração).

O consumo específico de carvão mineral, somando o utilizado para produção de coque e os finos adicionados diretamente no alto-forno, é de 19,30 GJ/t aço segundo estudo da EPE (PINZÓN et al., 2018). Tomando como comparativo a média de 2010-2019 para os valores de demanda de carvão mineral do setor siderúrgico (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022a) e divididos pela produção de aço integrado a coque (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021), chega-se a um valor de 16,26 GJ/t aço, uma estimativa 16% mais baixa, mas uma diferença considerada aceitável.

O consumo específico de carvão vegetal apresentado no estudo da EPE é 8,78 GJ/t aço (PINZÓN et al., 2018), contrastando com o valor de 17,21GJ/t aço estimado através do BEN, que está 96% acima do primeiro. Além disso, o valor apresentado por outra referência nacional (SANTOS JUNIOR, 2011) e uma estimativa com base no Centro de Gestão e Estudos

Estratégicos (2015), respectivamente 18,80 e 19,30 GJ/t aço, são mais próximas à estimativa com base no BEN.

Assim sendo, no presente estudo adotou-se o valor da EPE para o consumo de carvão mineral e a média das demais referências (excluindo o valor da EPE) para o carvão vegetal. Todas as fontes mencionadas foram utilizadas para determinar os desvios padrões no método de Monte Carlo (vide item 3.6).

Em relação à eletricidade, o fator de consumo líquido na rota integrada a coque segundo a EPE é de 71 kWh/t aço (PINZÓN et al., 2018). Esse valor aumenta abruptamente para 1.196 e 2.141 kWh/t aço para a rota a carvão vegetal e semi-integrada, respectivamente. Esse aumento explica-se, no caso da rota semi-integrada, pela própria tecnologia EAF, a qual se baseia em eletrólise da sucata, e, no caso da rota a carvão vegetal, normalmente não é realizada a cogeração de eletricidade a partir dos gases de alto-forno (BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009, p. 68). A rota integrada a coque autoproduz quase 95% da eletricidade consumida. Esse quadro de alta intensidade elétrica torna a matriz de geração nacional muito relevante para as emissões no cenário de BC, onde ocorre aumento de tais rotas.

A Tabela 5 sintetiza os fatores de consumo de energia para a fabricação do aço. Com exceção do gás natural, o consumo de outras fontes para fins energéticos (diesel, GLP, etc.) é mínimo dentro da matriz do aço e, portanto, essas fontes foram desconsideradas.

A Tabela 6 apresenta os FEs resultantes da multiplicação dos fatores de consumo de energia da Tabela 5 pelos FEs de energia fornecidos pelo guia do IPCC (GÓMEZ et al., 2006). Um caso particular foi o FE associado ao uso do carvão vegetal. No presente estudo, foram consideradas duas origens para o carvão vegetal: madeira de replantio e madeira de extração. A evolução da participação de cada origem nos cenários é explorada na subseção 3.2.2. Quanto ao FE, para o carvão de origem de madeira nativa (extração), estimou-se um valor de 31 tCO₂e/t aço. Esse valor, 17 vezes maior que o da rota integrada a coque, foi obtido pela média de 2000 a 2007 das razões entre a emissão por tonelada de aço da via carvão nativo e da via coque, apresentados no material suplementar do artigo de Sonter et al. (2015). Já para o carvão vegetal, originado de replantio, considerou-se a emissão associada à queima como neutra em carbono (emissão líquida zero) e a emissão associada ao manejo da floresta plantada como 0,145tCO₂e/t carvão vegetal (SONTER et al., 2015).

Tabela 5- Fatores de consumo específico de energia (GJ/t)

	BF coque	BF carvão vegetal	EAF
Redutores			
Carvão mineral (mais finos)	19,30	1,70	-
Coque	-0,31 (1)	-	-
Carvão vegetal		18,44 (2)	-
Gases de processo			
Gás de coqueria	-	-	-
Gás de alto-forno	-	-0,86	-
Gás de aciaria	0,001	-	-
Energia térmica			
Gás natural	1,23	1,53	1,54
Óleo combustível	0,001	0,058	-
GLP	-	0,052	-
Óleo diesel	-	-	0,005
Energia elétrica			
Eletricidade (kWh/t)	71	1.196	2.141

Fonte: Elaboração própria com base na EPE (PINZON et al., 2018).

(1) Baseado em Brasil. Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética (2009).

(2) Baseado na média entre o BEN (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022a), Santos Junior (2011) e Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2015).

Nota: Valores negativos representam produção líquida de energia.

Tabela 6- Fatores de emissão para a produção de aço (tCO₂e/t)

	BF coque	BF carvão vegetal (nativo)	BF carvão vegetal (replanteio)	EAF
Processo	1,83	31,00	0,21	-
Energia térmica	0,07	0,09	0,09	0,09

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da Tabela 5 e Gómez et al. (2006).

As emissões referentes ao transporte de carvão do porto até as usinas de aço foram estimadas em 42,3kgCO₂e por tonelada de aço de alto-forno, com base no método utilizado por Sonter et al. (2015). A estimativa considera o FE de transporte por trem, $2,96 \times 10^{-5}$ tCO₂e.t¹.km¹, advindo do repositório de ACV do *Ecoinvent* versão 3.5 (ECOINVENT ASSOCIATION, 2019), o consumo de 780kg de carvão por tonelada de aço (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2019) e uma viagem baseada na distância entre o Quadrilátero Ferrífero e o Porto de Tubarão, 900km, porque o Quadrilátero é a maior região produtora de aço no Brasil e a diferença comparada à outra rota (Ponta da Madeira – Carajás) é praticamente irrelevante (8km ou 0,8%).

Passando para o setor de cimento, a principal referência para determinação dos fatores foi a base de dados *Getting the Numbers Right* do GCCA, que apresenta valores globais e

nacionais, incluindo o Brasil. Segundo essa base, a emissão por tonelada de clínquer, excluindo a energia elétrica, foi 832 kgCO₂ no ano de 2019 (GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION, 2020).

O FE de processo de descarbonatação do calcário foi extraído do guia do IPCC (MALDONADO et al., 2006), equivalente a 0,52 tCO₂/t clínquer. O consumo de energia térmica é assumido como a média do período de 2012 a 2019, equivalente a 3,54 GJ/t clínquer.

Foi realizada uma estimativa somando-se o FE de processo e a emissão proveniente do consumo de energia apresentada pelo BEN de 2010 a 2018 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022a). Comparada aos valores do GCCA para o mesmo período, a diferença foi em média de 3%, o que indica boa consistência.

Em relação ao consumo de energia elétrica, adotou-se o fator de 111kWh/t cimento referente ao ano de 2019 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022b). Esse valor também é a média dos últimos 10 anos apresentada no BEN, enquanto a média do mesmo período apresentada pelo GCCA é muito próxima, 107kWh/t cimento. Além dos energéticos utilizados no processo de fabricação do clínquer, também se considerou o consumo de carvão mineral e diesel no setor de cimento. Demais energéticos não possuem participação relevante. A Tabela 7 apresenta os fatores utilizados para o setor de cimento.

Tabela 7- Fatores específicos para o setor de cimento

Fatores para produção de clínquer	
Emissão de processo (tCO ₂ /t)	0,52
Energia térmica (1) (GJ/t)	3,54
Fatores para a produção de cimento	
Eletricidade (kWh/t)	111,21
Carvão mineral (GJ/t)	0,05
Diesel (GJ/t)	0,04

Fonte: Elaboração própria com base em IPCC (MALDONADO et al., 2006), *Global Cement and Concrete Association* (2020) e Empresa de Pesquisa Energética (2022a).

(1) A energia térmica não é especificada por energético na tabela, pois a composição da matriz varia conforme os cenários apresentados na subseção 3.2.4.

Por sua vez, a Tabela 8 apresenta os FEs dos materiais suplementares adicionados ao cimento e dos combustíveis alternativos, aos quais se propõe aumento de participação no cenário BC. Por se tratarem de subprodutos, os fatores da escória e das cinzas volantes não são referentes às suas produções (embutidas na produção de aço e termoeletricidade, respectivamente), mas sim aos processos de coleta, refinamento e transporte dos mesmos.

Tabela 8- Fatores de emissão dos materiais suplementares no cimento

Material Suplementar	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Cinzas volantes	0,082	Miller et al. (2018)
Escória	0,038	
Pozolana natural	0,005	
Filler calcário	0,005	
Combustível Alternativo	Emissão (tCO₂/GJ)	
Pneu (1)	0,080	Monteiro e Mainier (2010)
CDR	0,036	Calculado com base na <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> (2012) e Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020)
Resíduos agrícolas e lodo	-	IPCC (GÓMEZ et al., 2006)

Fonte: Elaboração própria com base nas referências indicadas na própria tabela.

(1) Convertido na fonte de tCO₂/t com base no poder calorífico de 7.667 kcal/kg (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008).

Para o cálculo do FE atribuído à combustão do Combustível Derivado de Resíduo (CDR), adotou-se a fração de matéria não orgânica no Resíduo Sólido Urbano (RSU) brasileiro de 39% com base nos dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020). Para o método de Monte Carlo, o desvio padrão dessa fração foi calculado em 10,3% com base nas amostras de 104 cidades brasileiras compiladas por Milanez et al. (2011).

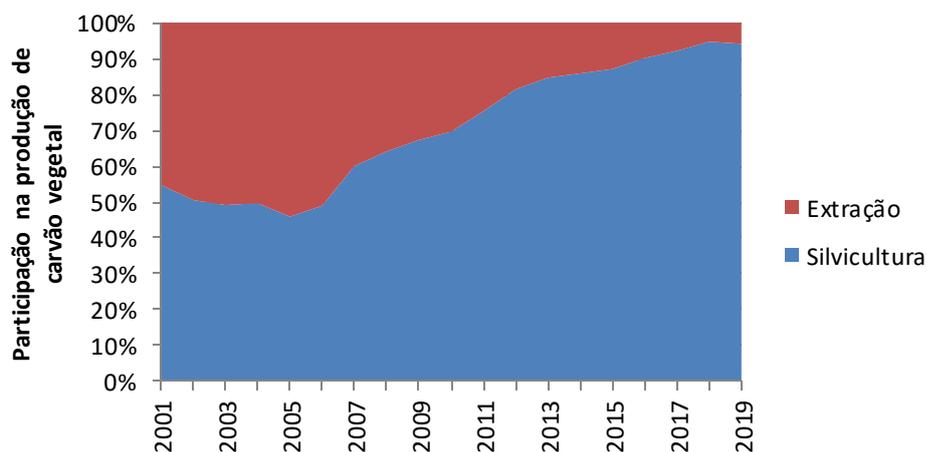
3.2.2 Análise sobre as tendências da origem do carvão vegetal para a siderurgia

No Brasil, tão grande quanto a preocupação a respeito do desmatamento é o desafio de projetar a atual tendência do uso de carvão vegetal extrativista na siderurgia, uma vez que as poucas estimativas realizadas por instituições confiáveis são discrepantes. Um exemplo é a comparação do valor de carvão vegetal proveniente de floresta nativa apontado pelo *Worldwide Fund for Nature* et al. (2012, p. 7) com o valor obtido a partir do Instituto Brasileiro de

Geografia e Estatística (2021a), respectivamente 60% contra 30%. Isso ocorre por conta de o IBGE não contabilizar o comércio informal da madeira.

O presente trabalho se apoiou nos dados da Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS) (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2021a), já que outras instituições também se fundamentam nos mesmos dados, como o Sistema Nacional da Informações Florestais (SNIF) e o Instituto Brasileiro de Árvores (IAB). A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, do inglês *Food and Agriculture Organization* (FAO), também apresenta dados de produção total próximos ao da PEVS a partir do ano de 2009. A evolução do carvão vegetal de extração versus o de silvicultura para o período 2001-2019 pode ser acompanhada na Figura 9.

Figura 9- Extração vs. Silvicultura na produção de carvão vegetal (2001-2019)



Fonte: Elaboração própria com base em dados publicados pelo IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2021a).

A participação do carvão vegetal de extrativismo reduziu-se de 45%, em 2001, para 6%, em 2019, resultando em uma redução média do extrativismo de 10% a.a. Para o cenário BAU, adotou-se essa tendência para projetar a redução do extrativismo até o ano de 2050. Para o cenário BC, assume-se que uma forte política de regulação e monitoramento seja adotada para garantir que 100% do carvão vegetal utilizado na siderurgia seja de floresta plantada a partir de 2024, primeiro ano de penetração do cenário.

3.2.3 Setor de aço: Evolução das estratégias de baixo carbono até 2050

Uma variedade de estudos que avaliaram o potencial de redução de emissões no setor de aço tem em comum a proposição do aumento da reciclagem de sucata pela rota do EAF, como os de Hasanbeigi et al. (2014), Zhang et al. (2018), e Li et al. (2019) para a China, atualmente a maior produtora e exportadora de aço no mundo.

Uma das barreiras mais notáveis para o aumento substancial da reciclagem é a inércia devido à longa vida-útil das plantas integradas já existentes, juntamente com a demanda de aço de alta qualidade por alguns usos finais, uma vez que a qualidade do aço decai ao longo dos ciclos de reciclagem (PAULIUK; WANG; MÜLLER, 2012). Outro fator que interfere na circularidade do aço é a vida-útil dos produtos e os padrões de comércio. Estimou-se que 50% do aço que estaria disponível em 2100 se perderiam em aterros, estoques obsoletos ou pilhas de escória (PAULIUK et al., 2017).

Além disso, apesar da conclusão de que o estoque de sucata seria suficiente para uma transição da economia linear para a reciclagem na China (ZHANG et al., 2018), esta condição acaba não sendo válida para todas as regiões do globo, como o Brasil (como será apresentado na subseção 4.1), fazendo necessária a adição de outras estratégias similares voltadas para a rota do alto-forno.

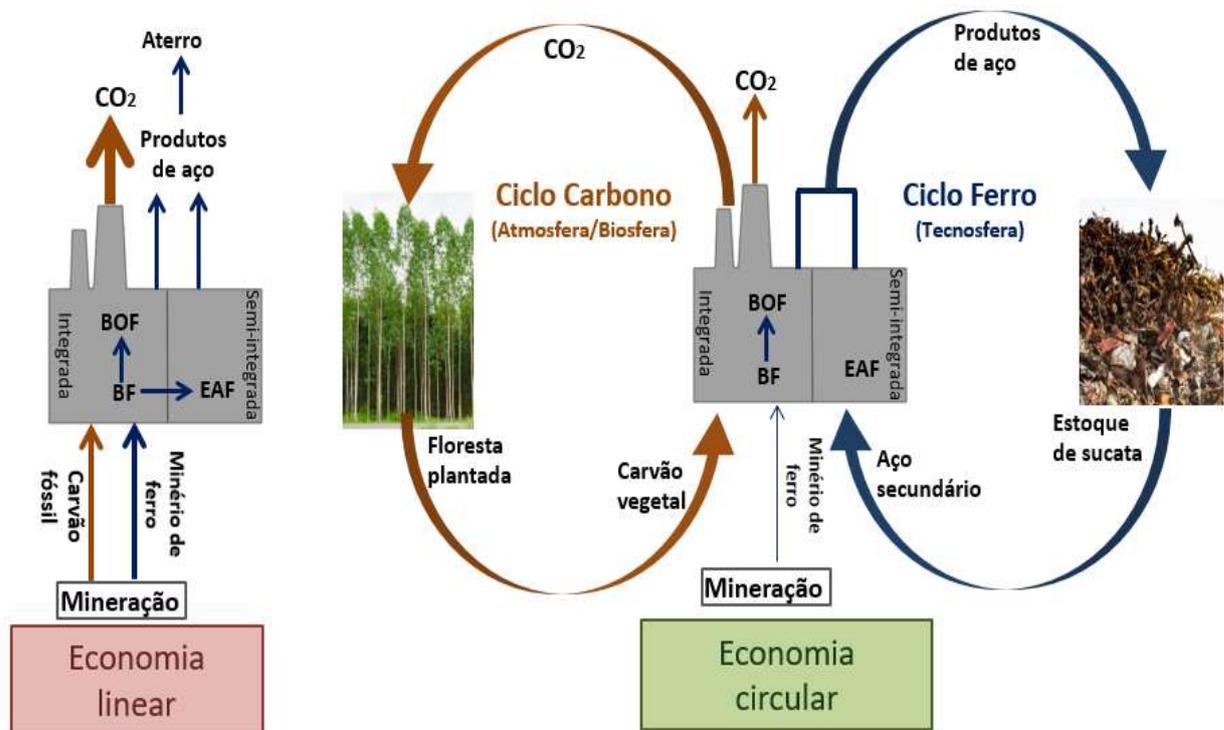
O uso de biomassa plantada como combustível no alto-forno, além de ser um conceito de energia renovável, também é vista como estratégia de economia circular por alguns autores, uma vez que esta medida permite restaurar paisagens e capital natural através de culturas de rápido crescimento (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2020). Já outros autores tem utilizado o conceito de “Bioeconomia Circular” para demonstrar as intersecções que existem entre a economia circular e o uso da biomassa (CARUS; DAMMER, 2018).

Uma revisão de vários agentes redutores baseados em biomassa mostrou que o carvão vegetal é a alternativa mais promissora para substituir o coque de carvão no alto-forno (SUOPAJÄRVI et al., 2017a). Sem algum mecanismo econômico (taxas ou créditos de carbono), entretanto, a produção de aço baseada em carvão vegetal não é competitiva com a baseada em coque (NORGATE; LANGBERG, 2009). Enquanto isso, um estudo para o Brasil sugere que as limitações relacionadas ao uso de carvão vegetal poderiam ser superadas através de ganhos de eficiência na fase de produção e de uso do mesmo (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2015). De fato, a baixa participação global do carvão vegetal na

produção de aço pode ser explicada, em parte, pelo uso majoritário de fornos tradicionais de baixa eficiência (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019).

Dado este contexto, elegeu-se o aumento da reciclagem e o aumento do carvão vegetal como estratégias de economia circular para a indústria brasileira de aço até 2050. Enquanto a reciclagem busca fechar o ciclo do ferro dentro da tecnosfera, o carvão vegetal leva ao fechamento do ciclo do carbono no sistema atmosfera-biosfera. Tal modelo se contrapõe ao processo linear que atualmente predomina na indústria, como ilustra a Figura 10.

Figura 10- Representação do modelo linear versus circular na indústria de aço



Fonte: Elaboração própria.

Nota: A largura das flechas sugere a intensidade do fluxo. A imagem busca contrastar os dois modelos de economia, porém, no mundo real, não existe rota que funcione 100% de forma linear ou circular.

A evolução da reciclagem e do carvão vegetal ao longo dos anos no cenário BC foi determinada com base nos potenciais técnicos atingíveis para cada estratégia até 2050. Para a reciclagem, isto foi feito utilizando o modelo de avaliação de disponibilidade de sucata, do inglês *Scrap Availability Assessment Model* (SAAM), descrito no item 3.2.3.1. Para o carvão vegetal, foi necessário desenvolver uma avaliação baseada em critérios econômicos, já que o potencial técnico de carvão vegetal não se mostrou um limitante para o nível projetado de produção de aço (vide item 3.2.3.2). Cabe lembrar que as estratégias avaliadas já ocorrem em

menor medida no cenário BAU e, portanto, o cenário BC propõe o aumento da participação desses processos na produção de aço.

Para o cenário BAU, a produção a partir de carvão vegetal é mantida como 22% do ferro-gusa até 2050. Este é o valor médio obtido para o período de 2010 a 2019 (SINDIFER, 2020, p. 10). Considerando que a razão entre ferro-gusa para aço bruto é cerca de 81% com base nos dados históricos (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020b), pode-se assumir que a participação do aço, produzido a partir do carvão vegetal, se manterá em uma média de 18% até o final do período.

Para o cenário de reciclagem, a primeira premissa é a que a rota do EAF utiliza 100% de sucata, enquanto a rota do alto-forno utiliza 100% de aço virgem (minério de ferro). Na prática, a rota do EAF tem usado em média 55% de sucata na entrada total de ferro, enquanto a rota do alto-forno tem usado 8% (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2019). Embora a alocação de 100% não seja realista, já que ambas as rotas utilizam tanto minério de ferro como sucata, tal pressuposto foi assumido em vista do modelo e também é adotado por estudos semelhantes, como nos relatórios de ACV do *World Steel Association* (2017, p. 28). A segunda premissa é a de que a entrada de sucata tem origem em duas fontes: reciclagem interna, que se refere à sucata gerada pelos processos dentro dos limites das usinas; e a reciclagem externa, que se refere ao estoque de sucata dos produtos em final de vida ou apenas “estoque de sucata”, como será referido adiante para fins de praticidade.

Com base nos dados da Confederação Nacional da Indústria e Instituto Aço Brasil (2017, p. 22), foi possível calcular que a participação da reciclagem interna na produção total de aço variou entre 6,0% e 7,5% de 2010 a 2017. Tanto para o cenário BAU como para o cenário BC, assumiu-se uma taxa inicial de 7% e uma redução de 1% a.a. sobre essa taxa ao longo do período considerando uma melhora tecnológica na eficiência dos processos. Com relação à reciclagem externa, a participação desse tipo de sucata variou entre 9,9% a 11,4% no mesmo período. Assumiu-se no cenário BAU que a participação se manterá fixa em 11% até 2050, enquanto que no cenário BC, a partir de 2025, todo o estoque disponível será utilizado, sendo 2024 um ano de transição entre o cenário BAU e o BC.

As subseções a seguir apresentam o detalhamento das análises utilizadas para determinar a penetração das alternativas no cenário BC.

3.2.3.1 Reciclagem: Avaliação do estoque de sucata por meio do SAAM

O estoque de sucata de aço que estará disponível para reciclagem em EAF no Brasil para as próximas décadas depende de fatores técnicos, do padrão passado e futuro de consumo dos produtos de aço, e de questões logísticas. Na presente pesquisa, mensurou-se o montante de sucata até 2050 através da Equação 1, que foi baseada no modelo SAAM (MORFELDT; NIJS; SILVEIRA, 2015).

$$S_t = \sum_{i=1}^N [P_{t-T_i} \times n_{i;t-T_i} \times \rho_{i;t} \times (1 - \gamma)] \quad (1)$$

Onde:

- S = estoque total de sucata
- t = ano avaliado
- P = produção total de aço bruto
- T = vida-útil do grupo de aço
- i = grupo de aço
- n = participação do grupo de aço
- ρ = taxa de recuperação
- γ = constante de perdas

S é o estoque total de sucata disponível para reciclagem no ano t . P representa o consumo aparente de aço no Brasil. n é a participação de cada um dos grupos (i) de produtos de aço, os quais possuem vida-úteis (T) e taxas de recuperação (ρ) específicas.

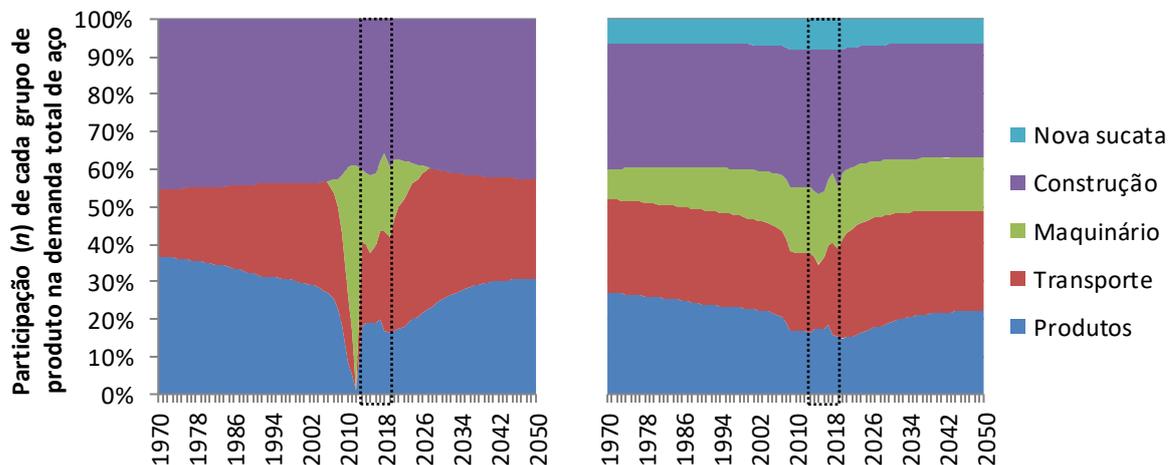
Os cinco grupos de aço considerados foram: produtos, transportes, maquinário, construção civil e nova sucata. O último representa todos os produtos de aço que não chegam a entrar na fase de uso, portanto estão disponíveis como sucata no mesmo ano em que são produzidos. Para esta categoria, assumiu-se uma participação de 9% baseado em Morfeldt, Nijs e Silveira (2015, p. 472).

Para as demais categorias de aço, averiguou-se que as participações variam ao longo do tempo e que tal variação possuiria relação com o perfil etário da população brasileira. Para incorporar esse aspecto no modelo, realizaram-se regressões lineares múltiplas com base no período de 2013 a 2019, nas quais a variável dependente foi a participação de cada categoria de aço e as variáveis independentes foram a participação relativa de três faixas da população: 0 a 14 anos, 15 a 64 anos e mais de 65 anos. Dados sobre a população foram extraídos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2018), enquanto que os dados sobre as categorias de aço foram baseados na “Tabela 4.g Evolução da distribuição do consumo aparente por

consumidores finais” do Instituto Aço Brasil (2020c, p. 26), agrupando-se as categorias 2.5, 4, 5 e 6 em produtos, e a categoria 2 (excetuando 2.5) em maquinário.

As quatro regressões apresentaram alta correlação, com R^2 acima de 0,8 para transportes e acima de 0,9 para as demais categorias de aço. Porém, ao aplicar a regressão tanto para o futuro (2020 a 2050) quanto para o passado (1970-2012), houve discrepâncias que fizeram ser necessária a calibração do modelo para a categoria “maquinário” no período como um todo, e para as demais categorias no período de 2010 a 2012, como pode ser observado na Figura 11. A calibração foi realizada através de normalização da participação da categoria “maquinário” com a participação relativa das demais categorias.

Figura 11- Modelo de evolução das participações (n) das categorias de aço de 1970-2050 sem calibração (esquerda) e com calibração (direita)



Fonte: Elaboração própria.

Nota: Período de 2013-2019, destacado nos gráficos, são dados baseados no Instituto Aço Brasil (2020c, p. 26), períodos 1970-2012 e 2020-2050 são estimados pelo modelo.

Segundo o modelo, com o envelhecimento da população brasileira, a participação de produtos de aço irá aumentar, enquanto as de transporte e de construção civil irão diminuir. Em ordem de comparação, Pauliuk, Wang e Müller (2013), em seu modelo de estimativa global, pressupõem uma participação de 47% da construção civil no consumo total brasileiro. A média do período de 2013-2019, segundo o Instituto Aço Brasil (2020c), foi de 40% e o modelo estima que essa participação cairá para 31% nas próximas décadas.

Com relação à vida útil T , utilizaram-se os valores da “Table S20” de Pauliuk, Wang e Müller (2013) como amostras para o método de Monte Carlo (maiores detalhes no item 3.6). A saber, os valores médios assumidos para cada categoria no Brasil são: 10 anos para produtos, 13 anos para transportes, 20 anos para maquinário e 50 anos para construção civil.

As taxas de recuperação ρ foram baseadas em um estudo de reciclagem de metais do Ministério de Minas e Energia (MME), que apresenta os valores de 45% para produtos (média de embalagens e utilidades domésticas), 70% para transportes, 40% para maquinário (bens de capital) e 20% para construção (VASQUES, 2009). Esses valores são, em média 42%, mais baixos que os valores adotados por Pauliuk, Wang e Müller (2013), porém foi assumida uma melhoria na taxa de recuperação ao longo dos anos partindo de 2009, semelhantemente ao que foi feito por Morfeldt, Nijs e Silveira (2015), mas com um aumento logístico (melhorias se tornam mais difíceis quanto mais próximo de 100% de eficiência) ao invés de exponencial. Como o modelo logístico leva a um crescimento mais lento do que o exponencial, adotou-se uma melhoria de 5% a.a. ao invés de 1% a.a. assumido pelos autores.

Por fim, a constante γ representa as perdas de aço em estoque obsoletos, assumida como 10% (MORFELDT; NIJS; SILVEIRA, 2015). Tanto a melhoria da taxa de recuperação como a constante de perdas foram consideradas como variáveis de incerteza no método de Monte Carlo.

3.2.3.2 Investigação sobre a disponibilidade de área e viabilidade econômica do carvão vegetal

Inicialmente, investigou-se a disponibilidade de área para plantio de eucalipto como um possível fator limitante para a penetração do carvão vegetal. O estudo de Piketty et al. (2009) avaliou um potencial total de 67,3 milhões de hectares (ha). Em uma abordagem estritamente técnica, conclui-se que área de plantio não é um limitante, já que na simulação principal do modelo, se toda a produção de aço utilizasse carvão vegetal, o requerimento de área estimado atingiria 15,8 Mha. Colocando em perspectiva, a área utilizada para plantação de soja no Brasil na safra de 2020/21 foi de 38,5Mha (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2022).

Assim, para determinar a penetração do carvão vegetal tendo um fundamento quantitativo, utilizou-se uma abordagem de viabilidade econômica. Foi desenvolvido um modelo de avaliação nomeado por participação de equilíbrio ou *break-even share* (BES). Este nome foi escolhido por causa da avaliação no qual o modelo teve por base: o preço de equilíbrio de carbono, do inglês *break-even carbon price* (BCEP).

O BCEP tem sido usado como análise econômica para projetos de mitigação, a exemplo, para estimar o preço do crédito de carbono necessário para viabilizar atividades de

reflorestamento no Canadá (MCKENNEY et al., 2004). O BECP também foi utilizado em cenários de baixo carbono no Brasil, para a indústria do estado de São Paulo (PACCA et al., 2018), e trata-se do preço de venda da tonelada evitada de CO₂ (US\$/tCO₂e) obtido em um sistema de mercado de carbono, o qual permite atingir a meta de retorno do investidor da tecnologia mitigadora e, portanto, tornando-a atrativa. A análise tem grande semelhança ao Custo Marginal de Abatimento, do inglês *Marginal Abatement Cost* (MAC), que será tratado na Subseção 3.4. A principal diferença é que, enquanto o MAC trabalha com uma *taxa de desconto* que é universal e parte do mercado financeiro, o BECP trabalha com uma Taxa Interna de Retorno (TIR) do investidor, também conhecida por *taxa de atratividade*, que é individual e parte do próprio investidor. Outra diferença importante é que na análise de BECP, tanto os custos do projeto como a massa de CO₂ evitada são trazidos a Valor Presente (VP), uma vez que o segundo representa uma receita ao ser vendido como crédito de carbono. A pergunta a ser respondida é qual o preço do carbono que equilibra o VP em zero mediante a taxa de atratividade, o que pode ser expresso pelas equações 2a ou 2b.

$$BECP_{(r)} = \frac{VP_{C;r}}{VP_{M;r}} \quad (2a)$$

ou

$$BECP_{(r)} = \frac{\sum_{t=0}^n \left(\frac{C_t}{(1+r)^t} \right)}{\sum_{t=0}^n \left(\frac{M_t}{(1+r)^t} \right)} \quad (2b)$$

Onde:

BECP = *break-even carbon price*
r = taxa de atratividade do investidor
C = custo anual do projeto
M = emissão anual evitada
t = ano avaliado

3.2.3.3 Carvão Vegetal: proposição do modelo BES

A ideia de equilíbrio presente no modelo de BECP foi o que inspirou o desenvolvimento do BES para o presente trabalho. No caso, em vez do preço de venda do carbono, a pergunta a ser responder é qual a participação máxima de produção de aço baseada em carvão vegetal, dentro da rota do alto-forno, que garante a TIR esperada pelo investidor, tendo por pressuposto

que produzir aço a partir de carvão vegetal é mais caro do que a partir de coque de carvão. Isto é expresso pela Equação 3, onde todas as variáveis estão na base de uma tonelada de aço.

$$BES = \frac{\sum_{t=2020}^{2050} \left(\frac{R - C_{cc;t}}{(1+r)^{t-2020}} \right)}{\sum_{t=2020}^{2050} \left(C_{cv;t} - C_{cc;t} - \frac{R \times P}{(1+r)^{t-2020}} \right)} \quad (3)$$

Onde:

- BES = *break-even share*
- t = ano avaliado
- C = custo de produção
- cc = coque de carvão
- cv = carvão vegetal
- r = taxa de atratividade
- P = prêmio sobre a receita do aço verde

C é o custo de produção em US\$ por tonelada de aço via carvão vegetal (cv) e via tradicional com coque de carvão (cc) para o ano i . Os custos adotados para ambas as vias são os mesmos utilizados na análise MAC e, portanto, apresentados na subseção 3.4.1. R é a receita pela venda do aço. O preço médio do aço foi considerado como US\$861/t, esse valor é a média dos produtos de aços longos e planos apresentados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021), ponderada pela projeção da demanda de longos e planos até 2050. P é um elemento opcional no cálculo do BES e representa um possível prêmio (porcentagem) sobre a receita do aço baseado em carvão vegetal, que também é denominado aqui por “aço verde”, dado o mesmo como um produto sustentável. Isto possibilitou as análises de sensibilidade apresentadas no item 4.3, porém, na simulação principal, esse valor foi considerado como zero.

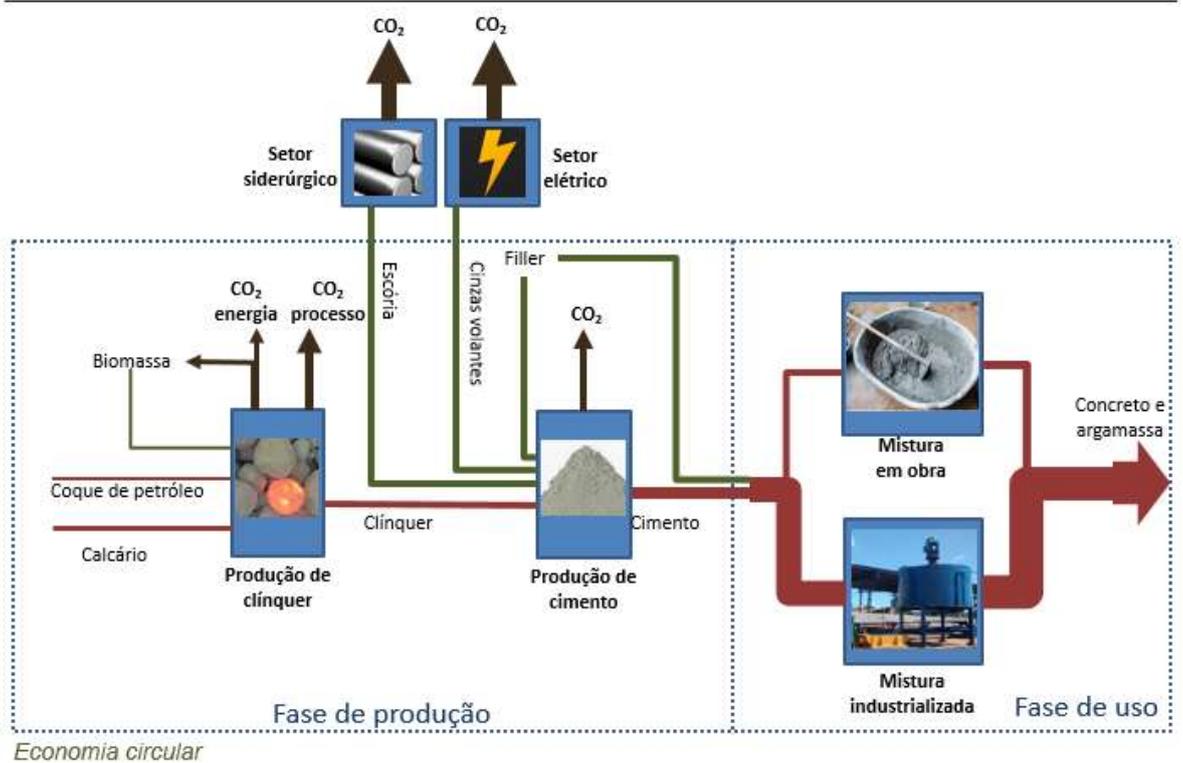
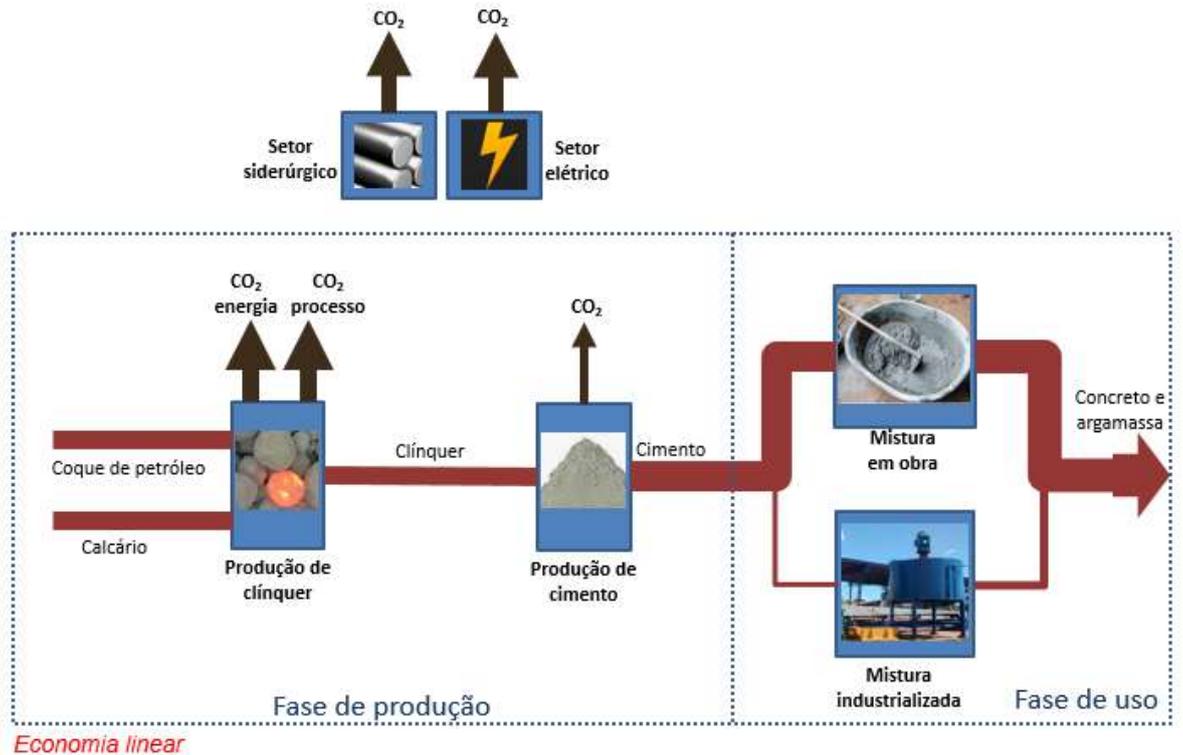
r representa a taxa interna de retorno (TIR) esperada pelo investidor. Apesar de ser um componente de peso no BES, também é o mais difícil de ser estimado. Cada investidor em um mesmo setor pode apresentar uma meta de retorno particular, além de a mesma ser influenciada pelo cenário econômico e pelas taxas sociais que estão sendo aplicadas. Se as taxas de juros apresentarem uma tendência decrescente, tal como ocorreu do segundo trimestre de 2019 até o início de 2021 (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2022), possivelmente, isso faria com que os atores prefiram investir em novos projetos em lugar do mercado financeiro. Entretanto, para efeitos do modelo, assumiu-se r como 15%, o mesmo valor adotado para o setor siderúrgico no estudo de baixo carbono para a indústria de São Paulo (PACCA et al., 2018, p. 78), 9% acima da taxa de desconto utilizada na análise MAC. A taxa de atratividade foi incluída como variável de incerteza no método de Monte Carlo e também foi objeto da análise de sensibilidade.

O resultado do BES é um fator de 0 a 1 e representa a participação máxima da rota do carvão vegetal dentro da rota do alto-forno. Este valor foi multiplicado pela massa remanescente (isto é, excluindo a parcela que já foi substituída pelo aumento da rota semi-integrada no cenário BC) de aço via alto-forno total de 2020 a 2050, uma vez que o BES é um valor que engloba todo o período analítico. Sendo assim, foi necessário distribuir a massa de aço a carvão vegetal ao longo dos anos. A distribuição foi feita de forma linear crescente a partir de 2024, adotado como primeiro ano em que os cenários BAU e BC se diferenciam. Esse cenário de penetração do carvão vegetal é o que, em teoria, mantém a viabilidade econômica dessa estratégia.

3.2.4 Setor de cimento: Evolução das estratégias de baixo carbono até 2050

Para o setor de cimento, propõem-se três estratégias de baixo carbono, as quais, assim como no caso de aço, representam o aumento da participação de processos que já são praticados no setor. A principal diferença em comparação com o setor de aço, em relação ao tratamento das emissões, é que, para haver eficácia, é necessário ir além do processo de fabricação de cimento, englobando a fase de uso na construção civil. Isto se sustenta, em primeiro momento, pela oportunidade da eficiência material por meio da industrialização do concreto e da argamassa e, em segundo momento, pela substituição por materiais suplementares poder ocorrer tanto na fase de produção (deslocando clínquer), quanto na de uso do cimento. A abordagem é ilustrada na Figura 12, contraposta ao modelo linear, predominante no BAU.

Figura 12- Representação de modelo linear versus circular na indústria de cimento



Fonte: Elaboração própria.

Nota: A largura das flechas sugere a intensidade dos fluxos.

A estratégia dos materiais suplementares é a que representa a simbiose industrial, um dos pilares da conexão entre os setores de aço e cimento no modelo, e também envolve um terceiro setor de grande importância: o setor elétrico.

Mesmo que estudos tenham apostado no filler como substituto mais promissor ao clínquer (JOHN et al., 2018; PUNHAGUI et al., 2018; SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2019; REIS et al., 2021), aqui será dada prioridade de utilização à escória e às cinzas volantes, como será detalhado na Subseção 3.2.4.2. Esses estudos pressupõem que as ofertas de escória e de cinzas serão comprometidas no futuro, no caso da escória, pela redução da participação do alto-forno na produção de aço e, no caso das cinzas, pelo aumento da capacidade instalada em energias renováveis para atender à crescente demanda elétrica.

O presente estudo amplia o horizonte de cenários possíveis dessas ofertas, já que existe a oportunidade de aproveitar escória de EAF, embora a qualidade seja inferior, e de alto-forno a carvão vegetal. Ao mesmo tempo, é possível que o aumento da oferta elétrica se dê por termelétricas e não por fontes renováveis, a depender da política energética das futuras gestões. Além disso, filler é um material inerte e, portanto, o máximo aproveitamento de escória e cinzas não entra em conflito com o filler, pelo contrário, são materiais complementares e o potencial total de substituição é aprimorado quando incluídos todos esses tipos de materiais.

A última estratégia avaliada para cimento é o aumento do coprocessamento, já realizado na indústria, em substituição ao coque de petróleo. O uso de biomassa e resíduos entra no escopo da economia circular assim como o carvão vegetal para a indústria de aço. O destaque é dado à utilização de resíduos sólidos urbanos na forma de CDR.

No objetivo de evitar duplas contagens, a implantação das medidas no modelo segue a mesma ordem com que são apresentadas nas próximas subseções.

3.2.4.1 Eficiência material por meio da industrialização na construção civil

Esta estratégia envolve uma mudança de mercado, aumentando a participação dos processos industriais de fabricação de concreto e argamassa, em detrimento da preparação dos mesmos nos canteiros de obra. O controle industrial do processo reduz os desperdícios de cimento na preparação desses produtos. Por reduzir a demanda de cimento para gerar a mesma quantidade de produtos finais, configura-se como uma medida de eficiência material.

Segundo Reis, Mack-Vegara e John (2019), a confecção de concreto misturado em obra de construção civil demanda 0,350 toneladas de cimento por metro cúbico (t/m^3), enquanto que a produção de concreto usinado diminui tal demanda para 0,285 t/m^3 . Adicionalmente à industrialização do concreto, o uso de um misturador planetário pode incrementar a eficiência, reduzindo o valor para 0,259 t/m^3 . A demanda elétrica do misturador é 0,6852 kWh/ m^3 de concreto. No caso da argamassa, a demanda é reduzida de 0,276 para 0,253 t/m^3 da produção em obra para a produção industrializada.

No cenário BAU, a participações de cada tipo de destinação/uso do cimento mantém a tendência histórica do período de 2004 a 2018 até o ano de 2050. Este cenário está em conformidade com o adotado por Reis et al. (2021): 49% do cimento para concreto é usinado, enquanto que somente 4% da argamassa é industrializada; a participação na destinação do cimento é 31% para concreto, 59% para argamassa e 10% para outros usos.

No cenário BC, foi assumido para ambos os produtos que a participação da industrialização aumenta linearmente do patamar do cenário BAU em 2023 para 90% em 2030, mantendo este nível até 2050. No caso do misturador planetário em associação com o concreto usinado, a penetração atinge 100% a partir de 2030.

3.2.4.2 Aumento das adições no cimento: disponibilidade de escória e cinzas volantes

Para esta medida, inicialmente foram avaliadas as ofertas de escória e de cinzas volantes até 2050 em cada cenário.

Para o cálculo da escória, assumiu-se que são gerados 401kg de escória a cada tonelada de aço produzido via integrada (BF-BOF) e 169kg/ $t_{aço}$ pela via EAF (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2021). Como existe uma carência de referências que apresentem a produção de escória especificamente para a via de carvão vegetal, também denominada escória ácida, foi assumido o mesmo valor de 401kg/ $t_{aço}$ da rota integrada a coque. Ressalta-se que a utilização de escória de aciaria e ácida dependem de ações tanto da indústria como legislativas (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2019, p. 23) e sua ausência será objeto de análise na subseção 4.2.

Para o cálculo das cinzas volantes, foi assumido que a razão da massa de cinzas para a massa de carvão é de 40,2% com base em uma amostra de Capivari/SP (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2021), onde está localizado o maior complexo termoeletrico a

carvão da América Latina. Além disso, assume-se que 80% da massa de cinzas são cinzas volantes (CANPOLAT, 2011) e que a eficiência de conversão das termoeletricas a carvão é de 35%. Tal rendimento está consonante com os cenários do setor elétrico (PEREIRA et al., 2015) assumidos no estudo. Assim, chegou-se à conclusão de que a produção de cinzas volantes na geração termoeletrica é de 277kg/MWh.

Da produção total de escória e de cinzas volantes, foram deduzidos 10% de perdas para o montante máximo disponível como adições no setor de cimento.

3.2.4.3 Aumento das adições no cimento: penetração da estratégia

Uma vez avaliadas as disponibilidades de escória e de cinzas volantes, determinou-se o quanto seria possível produzir cada tipo de cimento com base no teor máximo permitido de escória e de cinzas volantes, respectivamente 75% no CPIII e 50% no CPIV. Esses valores são normatizados pela NBR 16697⁸ da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018).

Na fase da produção de cimento, foi dada prioridade à produção de CPIII, seguido de CPIV e por último ao CPII-F, a classe de cimento que permite até 25% de filler em substituição ao clínquer, segundo a mesma norma. Na fase da produção de concreto e argamassa, é possível aumentar ainda mais o conteúdo de filler, de forma que sua participação total chegue a 45% no concreto e 30% na argamassa. Apesar de estudos terem conseguido valores que chegam até 70% de substituição para o concreto em laboratório, é necessário conhecimento, técnicas e equipamentos de dosagens adequados para garantir as propriedades do produto final (REIS et al., 2021). Assim, considera-se mais prudente considerar valores moderados de substituição.

Por fim, a transição do cenário BAU, que segue a tendência dos últimos anos da participação de clínquer e de adições, para o cenário descrito no parágrafo anterior, é realizada linearmente de 2024 a 2030 até atingir 100% de penetração, mantendo este patamar até o ano de 2050.

⁸ Na tabela de porcentagens permitidas, a NBR 16697 não se refere a cinzas volantes, mas à pozolana. As cinzas volantes são um tipo de material pozolânico e sua definição é dada na NBR 12653 de 1992.

3.2.4.4 Aumento da participação de combustíveis alternativos

Em 2019, a participação do coque de petróleo na matriz energética de cimento foi de 86% segundo o BEN (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022a). Assumiu-se para o cenário BAU que esse retrato se mantenha até 2050. O cenário BC foi baseado no *Roadmap* tecnológico do cimento (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2019). Os cenários são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9- Penetração dos combustíveis alternativos na matriz energética do clínquer

Energético	Cenário BAU	Cenário BC		
		2030	2040	2050
Coque de Petróleo	86%	66%	55%	46%
Combustíveis Alternativos	14%	34%	45%	54%
Carvão Vegetal	4%	0%	0%	0%
Lodo de esgoto	0%	2%	6%	7%
Resíduos Agrícolas	1%	3%	3%	4%
Resíduos industriais não perigosos	0%	11%	14%	17%
Resíduos industriais perigosos	4%	3%	4%	4%
Pneus Inservíveis	5%	5%	5%	5%
Resíduos Sólidos Urbanos (CDR)	0%	10%	13%	17%

Fonte: Elaboração própria com base no Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2019).

Diferente do setor de aço, a tendência é que o uso de carvão vegetal reduza para zero no cenário BC. O combustível alternativo mais promissor avaliado nessa estratégia é o CDR, que atualmente não está presente na matriz energética do clínquer. Apesar de as emissões referentes à produção do CDR não estarem sendo computadas no modelo, vale ressaltar que existe um adicional de redução do potencial de aquecimento global pela não destinação dos resíduos sólidos aos aterros, evitando assim a geração de metano. Uma ACV demonstrou que a emissão de CO₂e do CDR é cerca de dez vezes menor que a disposição em aterros (ANASSTASIA et al., 2020).

3.3 SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

As emissões por consumo de eletricidade nos processos de aço e cimento foram calculadas mediante a Equação 4, na qual todos os parâmetros variam a cada ano.

$$E_t = C_t \times FE_{SIN;t} \times (1 + L_t) \quad (4)$$

Onde:

- E = emissão Escopo 2 por aço e cimento
- t = ano avaliado
- C = consumo de eletricidade
- FE = fator de emissão
- SIN = Sistema Interligado Nacional
- L = perdas ocorridas na transmissão e distribuição elétrica
- P = prêmio sobre a receita do aço verde

As perdas foram calculadas interpolando os valores de 2019, 2024 e 2029 estimados pelo Plano Decenal de Expansão de Energia (BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021). Através desta operação, é possível estimar que a perda na rede reduzirá cerca de 1% ao ano até atingir 14,7%, em 2050. O FE médio do Sistema Interligado Nacional (SIN) foi calculado anualmente utilizando-se a Equação 5.

$$FE_{SIN;t} = \sum_{i=1}^N (S_{i;t} \times FE_i) \quad (5)$$

Onde:

- FE = fator de emissão
- t = ano avaliado
- S = participação da fonte primária de geração elétrica
- i = fonte primária de geração elétrica

O FE do SIN foi calculado anualmente através da participação (S) de cada fonte primária de geração (i) e de seu respectivo fator de emissão específico (FE_i).

Existem duas abordagens pelas quais o FE_i de cada tipo de geração elétrica poderiam ser estimados. A primeira abordagem utiliza as eficiências de conversão de cada tecnologia de geração e o FE de cada fonte primária de energia. Na segunda abordagem, mais robusta, os fatores são determinados através de ACV, o que inclui, além da fase de geração elétrica, a fase de produção da tecnologia bem como as emissões de GEE indiretas relacionadas à geração. As diferenças de fatores entre as duas abordagens podem ser observadas na Tabela 10. Os fatores

baseados em ACV são em média 15% superiores aos baseados simplesmente na conversão de combustíveis fósseis em eletricidade.

Tabela 10- FE_i das fontes primárias de geração elétrica por tipo de abordagem

Fonte	Abordagem- eficiência de conversão			Abordagem- ACV	
	Heat rate (tep/MWh)	FE combustível (tCO ₂ /GJ)	FE eletricidade (tCO ₂ /MWh)	FE (tCO ₂ e/MWh)	Referência
Não renováveis					
Gás natural	0,20	0,0561	0,4581	0,5180	Miranda (2012)
Carvão vapor	0,25	0,0946	1,0191	1,1440	
Óleo diesel	0,24	0,0741	0,7345	0,8290	
Óleo combustível	0,21	0,0774	0,6849	0,7810	
Outras não renováveis	0,15	0,0662	0,4250	0,5189	
Urânio contido no UO ₂	0,26	n.a.	0,0000	0,0140	
Renováveis					
Eólica	n.a.	n.a.	0,0000	0,0160	NREL (2020)
Hidráulica	n.a.	n.a.	0,0000	0,0860	
Solar	n.a.	n.a.	0,0000	0,0387	
Outras renováveis	0,21	n.a.	0,0000	0,0410	
Referência	Empresa de Pesquisa Energética (2022)	Gómez et al. (2006)			

Fonte: Elaboração própria com base nas referências apresentadas na própria tabela.

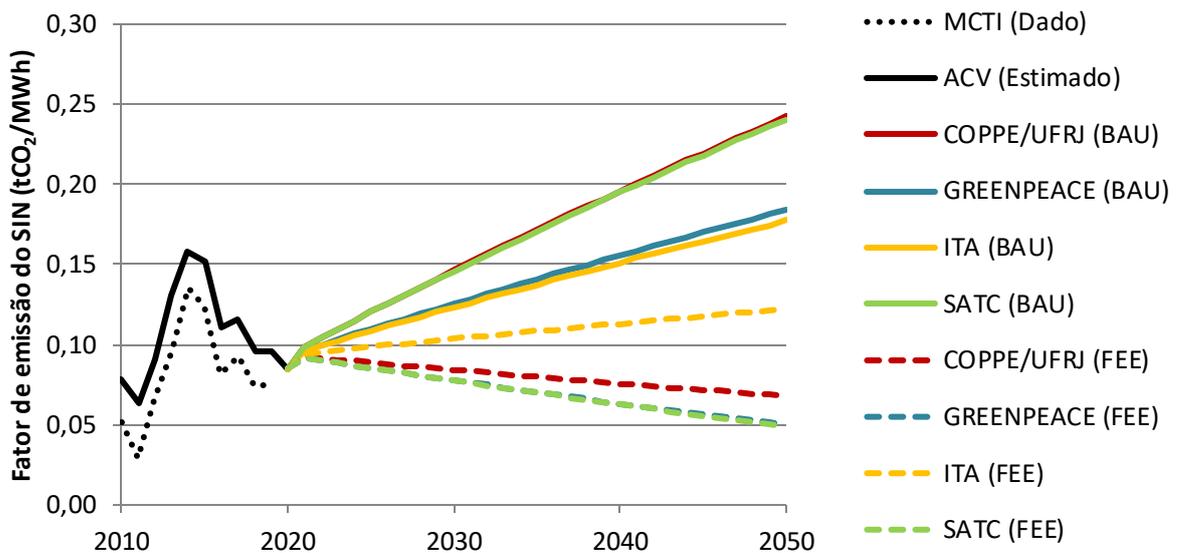
Nota: n.a. = não se aplica.

No objetivo de melhor refletir o real FE do SIN, o presente modelo adotou a abordagem de ACV. Foram utilizados os fatores estimados por Miranda (2012) para a maioria das fontes brasileiras de geração. A metodologia desse estudo se baseia em ACV harmonizada e está em concordância com a utilizada pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL, 2020). Para as fontes renováveis, entretanto, foi assumido que a geração elétrica associada é neutra em carbono.

Para a participação de cada fonte (S_i) até 2050, utilizou-se como base o estudo denominado “Cenários para a Matriz Elétrica 2050” (PEREIRA et al., 2015). Neste estudo, quatro instituições formularam, cada uma, dois cenários para a composição da matriz elétrica

brasileira. Um dos cenários, o cenário BAU⁹, se contrapõe ao outro cenário, onde se adotam medidas de redução de consumo sob a forma de um fator de eficiência energética (FEE). As participações das fontes de geração em 2050 nos oito cenários foram tomadas para projetar linearmente a matriz elétrica a partir da configuração de 2020. O resultado final pode ser observado na Figura 13.

Figura 13- Projeção do fator de emissão do SIN em diferentes cenários do setor elétrico brasileiro



Fonte: Elaboração própria baseada na Tabela 10 e no estudo de Pereira et al. (2015).

Nota: O gráfico não inclui as perdas de eletricidade na transmissão e distribuição. Na presente tese, somente foram utilizados os cenários COPPE/UFRJ (BAU), SATC (BAU) e Greenpeace (FEE).

É possível observar como os FEs são ligeiramente superiores aos divulgados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (2022) para o período de 2010 a 2020. Uma das causas dessa diferença pode ser atribuída à abordagem da ACV que considera todo o ciclo de vida da geração elétrica. A diferença seria ainda maior se estivessem sendo consideradas as emissões indiretas da geração elétrica renovável (hidráulica, eólica, solar).

Cinco dos oito cenários possuem tendência de aumento do FE em relação aos níveis atuais. O Cenário BAU do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) foi eleito para o cenário principal (vide Subseção 4.1). Esse cenário atinge o maior FE em 2050 e tem evolução bastante semelhante ao cenário BAU da Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de

⁹ Os cenários BAU para o setor elétrico, apresentados em Pereira et al. (2015), não devem ser confundidos com o cenário BAU desenvolvido na presente tese, a despeito de possuírem a mesma nomenclatura.

Santa Catarina (SATC). Ele prioriza a geração pelo menor custo em detrimento de baixas emissões de carbono e atinge um fator de 0,2423 tCO₂e/MWh em 2050, representando um aumento de 3,5% a.a. a partir de 2020.

Tal premissa foi adotada na simulação principal, pois não se prevê, a princípio, que o cenário BC para aço e cimento inclua medidas para reduzir as emissões do setor elétrico. Por outro lado, os cenários alternativos (subseção 4.2) abordam os efeitos da descarbonização do setor elétrico sobre as emissões totais de aço e cimento, tanto na redução do FE da eletricidade como na disponibilidade de cinzas volantes para substituição de clínquer no cimento.

3.4 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica dos cenários foi conduzida com base no MAC, uma metodologia usual no campo de mitigação de mudanças climáticas e que permite dar apoio aos tomadores de decisão para o alcance de metas de redução de GEE aliadas aos menores custos possíveis (WATKISS, 2018). O MAC é expresso em US\$/tCO₂e evitado, determinado através das equações 7, 8 e 9.

$$MAC = \frac{VPL_{BC} - VPL_{BAU}}{E_{BAU} - E_{BC}} \quad (7)$$

$$VPL = \sum_{t=2020}^{2050} \left(\frac{CAPEX \times FRC + OPEX - R}{(1+r)^{t-2020}} \right) \quad (8)$$

$$FRC = \left(\frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \right) \quad (9)$$

Onde:

<i>MAC</i>	= Custo Marginal de Abatimento
<i>VPL</i>	= Valor Presente Líquido
<i>E</i>	= emissões totais
<i>t</i>	= ano avaliado
<i>CAPEX</i>	= custo de investimento
<i>OPEX</i>	= custo de operação e manutenção
<i>R</i>	= receitas
<i>FRC</i>	= fator de recuperação de capital
<i>r</i>	= taxa de desconto social
<i>T</i>	= vida-útil dos ativos

VPL é o Valor Presente Líquido e *E* são as emissões, obtidos através de uma abordagem incremental: a diferença entre o cenário BC e o cenário BAU. O *VPL* é composto por custos de investimento (CAPEX), mais custos de operação e manutenção (OPEX), subtraindo as receitas (*R*). Os valores adotados para cada componente do MAC são apresentados nas próximas subseções.

FRC é o Fator de Recuperação de Capital, cuja função é transpor o CAPEX para parcelas constantes anualizadas, o compatibilizando com os demais custos anuais. *T* é a vida útil dos ativos, enquanto *t* representa o ano analisado e *r* a taxa de desconto, 6% ao ano, assumida com base na média da Taxa de Juros de Longo Prazo aplicada pelo BNDES de 4,9% em 2020 (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2022), com um adicional pelo risco de financiamento¹⁰.

Os custos advindos da literatura foram atualizados dos seus respectivos anos para o ano base de 2020. A atualização foi realizada, no caso do setor de aço, pela aplicação do índice de preços ao produtor (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2021b) e, no caso de cimento, através do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2021c). Os custos apresentados em dólares na fonte foram primeiramente convertidos em reais, através da cotação do dólar dos respectivos anos (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2021), para então serem aplicados os índices de inflação e, por último, reconvertido para dólares pela cotação do dólar em 2020.

Dado o grande volume de investimento em uma usina integrada, seja de aço ou de cimento, o CAPEX nestes casos foi distribuído ao longo de 5 anos, iniciando 2 anos antes do início de operação da usina. Para calcular o número de usinas a serem inseridas até 2050, partiu-se da atual capacidade instalada de aço e cimento para cada rota. No caso de aço, assumiu-se a capacidade inicial de 42,00Mt para rota integrada, sendo 12% representado por carvão vegetal, e 8,95Mt para rota semi-integrada¹¹. No caso de cimento, 71Mt para rota integrada e 23 Mt para rota de moagem. Essa estimativa foi feita com base no número de fábricas integradas e de moagem em 2014 (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2019) e na capacidade instalada total em 2020 (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2021).

¹⁰ O valor de 4,9% é a taxa média considerando as taxas aplicadas nos quatro trimestres de 2020. O adicional de risco refere-se ao fato da incidência sobre a TJLP de um *spread* básico e de um *spread* de risco que depende da classificação do próprio projeto a ser financiado.

¹¹ Informação obtida do Instituto Aço Brasil através de e-mail no dia 27 de janeiro de 2022.

Os custos da energia e dos redutores, que compõe parte do OPEX, foram projetados conforme a metodologia aplicada por de Souza et al. (2018), através das razões entre os preços históricos dos energéticos e do petróleo, apresentados no BEN (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022b), em seguida multiplicando essas razões pela projeção do preço do petróleo Brent apresentada no caso de referência do *Annual Energy Outlook* (US ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2020), que foi interpolado linearmente entre 2020 e 2050.

No caso da eletricidade, foram utilizados os custos da eletricidade projetados pelo mesmo estudo tomado como referência para o setor elétrico (PEREIRA et al., 2015) para manter consistência com o cenário de FE do SIN. Para estimar o preço ao consumidor final, foi posto sobre o custo um adicional de 32% referentes aos tributos. Essa porcentagem é o valor médio da classe industrial do período de 2011 a 2020, calculada com base nos dados da ANEEL (BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021). A projeção dos preços da energia é apresentada decenalmente na Tabela 11.

Nesta tese, as estratégias de baixo carbono não são apresentadas na forma de curva MAC, mesmo que seja usual em estudos do tipo. O primeiro motivo é pelo número de estratégias não ser relevante para serem representadas através de uma curva MAC, o segundo motivo, e o mais importante, é pela interdependência das estratégias no modelo, de forma que a escolha de implantação de algumas das medidas em detrimento de outras com base no MAC (este é um dos principais objetivos da curva MAC) altera o próprio MAC de cada medida.

Tabela 11- Projeção dos preços da energia

Energéticos	2020	2030	2040	2050
Preço do petróleo (US\$/bep)	59,00	74,33	89,67	105,00
Carvão (US\$/GJ)	3,67	4,62	5,57	6,53
Coque de carvão (US\$/GJ)	4,97	6,27	7,56	8,85
Carvão Vegetal (US\$/GJ)	5,12	6,45	7,78	9,11
Coque de petróleo (US\$/GJ)	9,65	12,16	14,67	17,18
Gás Natural (US\$/GJ)	11,33	14,27	17,22	20,16
Diesel (US\$/GJ)	22,86	28,81	34,75	40,69
Eletricidade (1) (US\$/MWh)				
COPPE/UFRRJ- BAU (principal)	27,92	66,83	93,40	99,94
SATC- BAU (alta geração de cinzas)	25,75	50,52	70,01	98,19
GREENPEACE- FEE (baixa geração de cinzas)	26,11	72,80	127,55	132,68

Fonte: Elaboração própria baseada em *US Energy Information Administration* (2020), Empresa de Pesquisa Energética (2022b) e Pereira et al. (2015).

(1) Os preços referentes ao cenário BAU da COPPE/UFRRJ foram considerados no cenário principal do presente modelo, esses preços se alteram nos cenários alternativos do setor elétrico. Vide item 3.5 para detalhamento da análise de cenários alternativos.

3.4.1 CAPEX e OPEX para o setor de aço

A Tabela 12 sintetiza os dados utilizados na avaliação econômica das duas estratégias voltadas para o setor de aço. A vida útil de todas as rotas foi adotada como 20 anos, consonante com as referências utilizadas.

Tabela 12- CAPEX e OPEX para as rotas tecnológicas de aço

Rota de aço	Capacidade (Mt/ano)	CAPEX (Milhões US\$)	OPEX fixo (Milhões US\$/ano)	OPEX variável (1) (US\$/t)	Referência
BF baseado em coque	4,0	3.375	397	161,29	Freitas, Vogelaar e Vogelaar (2018)
BF baseado em carvão vegetal	0,3	193(2)	3,9(2)	145,80(2)	Baseado em Santos Junior (2011)
EAF	1,0	472	150	174,31	Freitas, Vogelaar e Vogelaar (2018)

Fonte: Elaboração própria baseada nas fontes apresentadas na Tabela, com os valores monetários atualizados para o ano de 2020.

(1) Excluindo-se os custos referentes à matéria-prima e à energia.

(2) Valores baseados na média entre sinter e granulado, assumindo que a produção de ferro-gusa representa 70% dos custos totais do aço.

Os custos de matéria-prima foram calculados considerando os preços de mercado do minério de ferro e da sucata e as eficiências de conversão, ou seja, a razão entre a massa de aço produzida e a massa de ferro de entrada, no alto-forno e no EAF, respectivamente 67% e 77% (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2019). Para o preço do minério de ferro, foi adotada a média do ano de 2019, equivalente a US\$93,85/t minério (INDEXMUNDI, 2020). Para a sucata, entretanto, existe uma grande variação de mercado para cada região. Valores esparsos foram obtidos por pesquisa online e por contato com empresas do ramo, entretanto, pela ampla divergência, optou-se por adotar os custos utilizados no estudo de Freitas, Vogelaar e Vogelaar (2018). Os efeitos da variação do preço da sucata sobre os resultados estão presentes na análise de Monte Carlo.

Os custos referentes ao transporte do carvão mineral e vegetal foram baseados na projeção dos preços do combustível (diesel). Para o ano base 2020, o custo do transporte foi calculado de acordo com a Equação 10.

$$F_{2020} = \frac{C \times 2D \times P_{2020}}{S} \quad (10)$$

Onde:

F = custo do transporte

C = fator de consumo de Diesel

D = distância

P = preço do Diesel

S = participação do custo de combustível no custo de transporte

F é o custo do transporte por trem (no caso do carvão mineral) e por caminhão (no caso de carvão vegetal), em US\$/t. C é o fator de consumo de diesel, $9,41 \times 10^{-6} \text{ t}_{\text{diesel}} \cdot \text{t}^{-1}_{\text{coal}} \cdot \text{km}^{-1}$ para trem e $3,74 \times 10^{-5} \text{ t}_{\text{diesel}} \cdot \text{t}^{-1}_{\text{coal}} \cdot \text{km}^{-1}$ para caminhão (ECOINVENT ASSOCIATION, 2019). D é a distância assumida como 900km (SONTER et al., 2015) para a importação de carvão mineral do porto e 15,7km (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 2016) como a distância média entre as plantações de eucalipto e as unidades de carbonização¹². P é o preço do diesel em 2020 e S é a participação do custo de combustível no total do custo de transporte, assumido como 38% para caminhão e uma média de 25% para trem (PERÁ; COSTA; CAIXETA-FILHO, 2018). Para projetar os custos de transporte até 2050, utilizou-se a Equação 11 com base na elasticidade entre os mesmos em relação à variação dos preços do Diesel.

$$F_t = F_{t-1} \times \left[1 + \left(\frac{P_t}{P_{t-1}} - 1 \right) \times E \right] \quad (11)$$

Onde:

F = custo do transporte

t = ano avaliado

P = preço do Diesel

E = elasticidade do custo de transporte em relação ao preço

Baseado na análise de Perá, Costa e Caixeta-Filho (2018) para o período entre 2017 e 2018, foi encontrado que o custo de transporte aumentou conforme o aumento do preço do Diesel, com uma elasticidade de 0,34 e um desvio padrão de 0,08.

¹² Na análise, considerou-se que as plantas de aço se encontrarão próximas às plantas de produção de carvão vegetal. Na Subseção 5.2, se discute como o aumento da distância impacta o MAC da estratégia.

3.4.2 CAPEX e OPEX para o setor de cimento

Os custos de CAPEX e OPEX utilizados na análise das estratégias de cimento são apresentados respectivamente na Tabela 13 e na Tabela 14.

Tabela 13- CAPEX para o setor de cimento

	CAPEX (US\$)	Capacidade instalada (unidade/ano)	Vida útil
Setor de cimento			
Fabrica integrada	146.360.601	1.560.000t cimento	50
Silo para filler	60.713	2 unidades/usina	50
Fábrica de moagem	51.226.210	900.000t cimento	50
Setor da construção			
Usina de concreto- central nova	135.519	207.360m ³ concreto	20
Usina de concreto- adaptação com misturador	27.104	207.360m ³ concreto	20
Pá carregadeira	59.628	1 por concreteira	20
Caminhões betoneira (20 veículos)	1.084.153	1 por concreteira	5
Misturador	54.208	142.560m ³ concreto	15
Fábrica de argamassa- central nova	7.182.511	86.140m ³ argamassa	25

Fonte: Elaboração própria com dados de Punhagui et al. (2018) e Reis et al. (2021), com os valores monetários atualizados para o ano de 2020.

Tabela 14- OPEX para o setor de cimento

Matérias-primas	OPEX (US\$/t)	Fonte
Clínquer	27,26	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021)
Escória	11,17	
Pozolana/argila calcinada	25,23	
Gipsita	9,82	
Cinzas volantes	5,67	Rocha et al. (2020)
Filler calcário	17,83	Punhagui et al. (2018)
Água(1)	1,01	Camargo de Araújo e Bertussi (2018)
Receitas		
Cimento (2) (US\$/t)	159,89	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021)
Concreto usinado (US\$/m ³)	58,45	
Argamassa industrializada (US\$/m ³)	49,49	

Fonte: Elaboração própria com base nas referências apresentadas na Tabela, com os valores monetários atualizados para o ano de 2020.

(1) Em US\$/t de cimento, com base no consumo de 0,55 m³/t cimento (PUNHAGUI et al., 2018). O preço assumido da água de R\$9,49/m³ é a média nacional para a categoria industrial (CAMARGO DE ARAÚJO; BERTUSSI, 2018).

(2) Média dos tipos de cimentos para os quais haviam dados disponíveis na fonte (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2021).

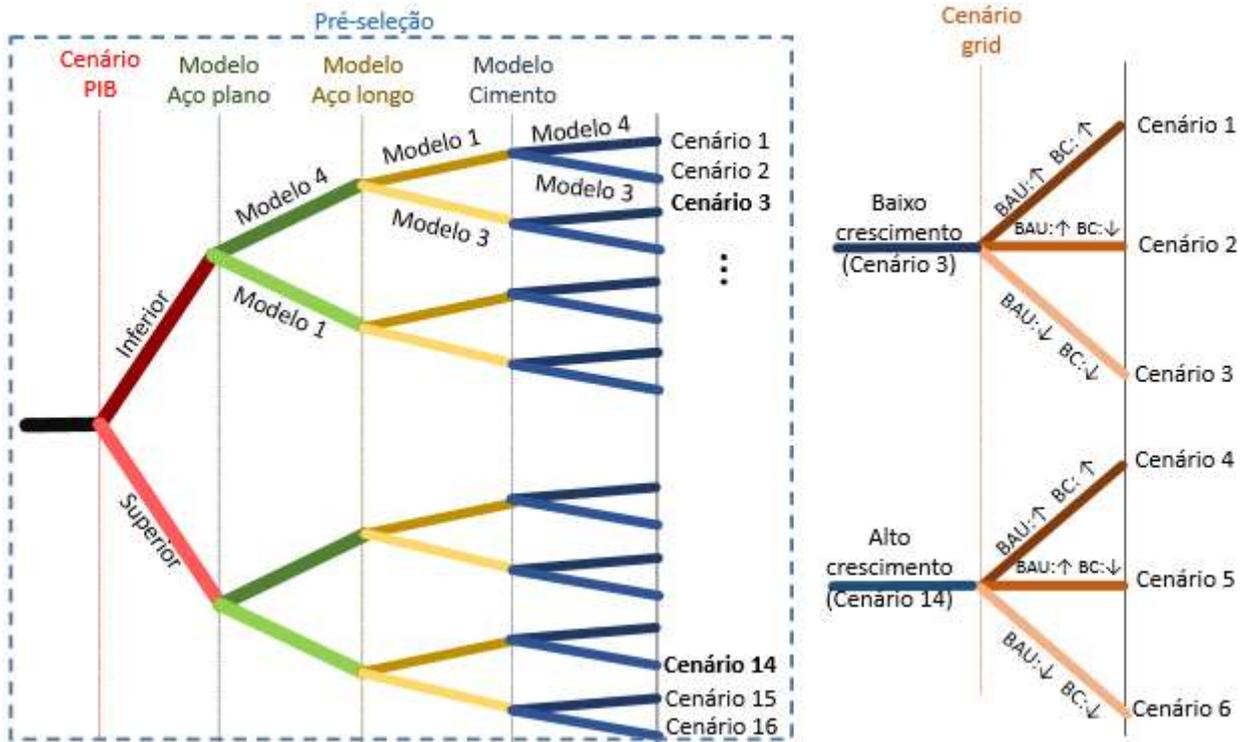
Para a estimativa do OPEX total a partir dos custos de matéria-prima (Tabela 14) e energia, considerou-se a distribuição dos componentes de custo apresentadas por Punhagui et al. (2018). Para uma fábrica integrada: 40% operação e manutenção, 35% materiais, 18% energia e 7% depreciação. Para uma fábrica de moagem: 13% operação e manutenção, 72% materiais, 9% energia e 8% depreciação.

Os preços de cimento ensacado, concreto usinado e argamassa industrializada foram utilizados para calcular as receitas na estratégia de eficiência material no setor da construção. As receitas foram calculadas excepcionalmente para essa medida, pois é a única no presente estudo que envolve uma mudança no mercado e alteração da receita do cenário BAU para o cenário BC. O efeito da inclusão e exclusão da receita sobre o MAC da eficiência material é discutido nos resultados.

3.5 ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS ALTERNATIVOS

A construção de cenários alternativos fez parte da análise sobre a simbiose industrial no cenário BC. A construção ocorreu através de uma árvore de cenários com cinco passos de ramificação, quatro relacionados aos pressupostos econômicos e um relacionado ao perfil futuro do setor elétrico. O esquema pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14- Árvore de cenários alternativos



Fonte: Elaboração própria.

Nota: Seta para cima simboliza uma geração crescente de cinzas volantes, seta para baixo simboliza a redução das cinzas para zero até 2050.

A primeira bifurcação é o cenário econômico apresentado pelo PNE, sendo o cenário inferior e superior estimados, respectivamente, em US\$24,5 mil e US\$40,6 mil per capita em 2050 (BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018). A segunda, terceira e quarta bifurcação se referem aos modelos econométricos com o primeiro e segundo maior R²-ajustado para cada categoria (vide Tabela 1 e Tabela 2).

Até a quarta bifurcação, são formados 16 cenários. Em vista de otimizar a quantidade de cenários, realizou-se uma pré-seleção com base no menor e no maior crescimento da produção total até 2050. No cenário 3 (menor crescimento), aço e cimento evoluem respectivamente 1,0% a.a. e 1,8% a.a., já no cenário 14 (maior crescimento), esses valores são 5,8% a.a. e 4,6% a.a. Esses dois cenários foram ramificados em mais seis cenários com a quinta ramificação.

A quinta e última ramificação se refere ao cenário da matriz elétrica em 2050 e condiz com três possibilidades: a primeira assume a maior participação de termelétricas a carvão (15,5%, fator médio do grid: 0,2757tCO₂e/MWh), conseqüentemente a maior disponibilidade de cinzas; a segunda assume que, junto com a implementação do cenário BC de aço e cimento,

será dada prioridade a um grid com menor FE (0% de carvão e 0,0572tCO₂e/MWh); e a terceira assume que esse grid de menor fator será implementado independentemente dos setores de aço e cimento, portanto presente em ambos BAU e BC.

3.6 ANÁLISE DE INCERTEZA

As incertezas no modelo foram incorporadas através do método de Monte Carlo. Seguindo o método, uma série de 36 variáveis, elegidas com base em sua importância para o modelo e por seu relevante grau de incerteza, foi randomizada. Por motivos de simplificação, pressupôs-se uma distribuição normal de probabilidade para a randomização de todas as variáveis.

Para tal procedimento, foi preciso determinar um valor de média e de desvio padrão para cada variável. O valor da média é igual ao valor assumido pela variável na simulação principal do modelo. A maioria das variáveis teve seus desvios padrões calculados com base em séries históricas ou amostrais. Para as variáveis cuja média foi um valor assumido, como exemplo a taxa de atratividade do carvão vegetal, os desvios foram calculados como uma porcentagem sobre a média de acordo com um grau assumido de incerteza. Por exemplo, para variáveis com baixo nível de incerteza, o desvio padrão foi considerado como a média multiplicada por 10%, para um nível maior de incerteza, a média multiplicada por 50%.

Limites superiores e inferiores foram gerados e calibrados para algumas das variáveis. Esses valores de truncagem foram necessários para evitar erros na saída do modelo ou mesmo por razões de lógica.

Ao todo, foram realizadas 10 mil simulações. Dentro da nuvem de cenários, foram calculados o mínimo, mediana, máximo e os percentis de 5% e 95% para as principais saídas do modelo. Essas estatísticas são apresentadas ao longo do item 4.1. As análises de sensibilidade (item 4.3) foram realizadas somente sobre o modelo principal, ou seja, sem a aplicação do método de Monte Carlo.

O Apêndice C apresenta a lista completa das variáveis e os valores adotados como média, desvio padrão, truncagem, e também observações específicas sobre o procedimento realizado.

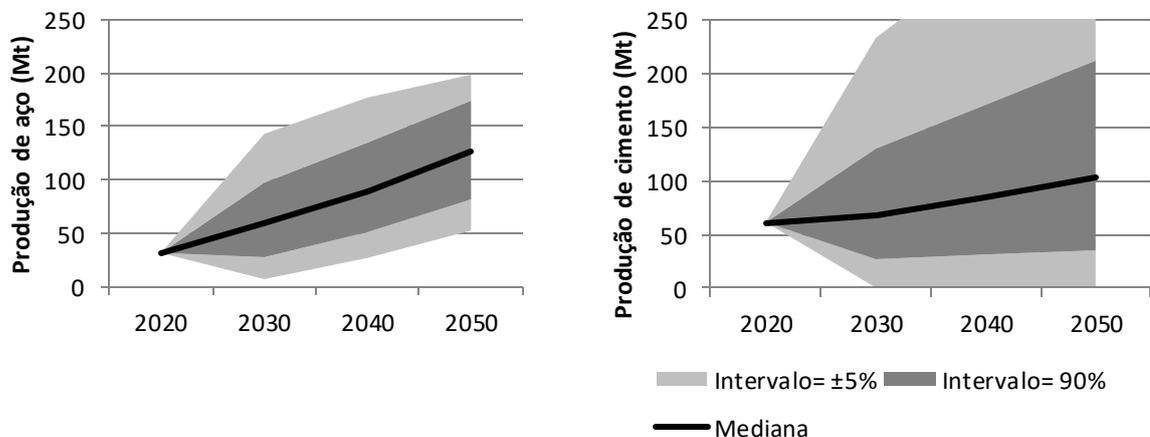
4 RESULTADOS

Os resultados do modelo são apresentados neste capítulo separados em três seções. A primeira seção apresenta os resultados para a simulação principal, que foi realizada com os pressupostos e variáveis conforme apresentados no Capítulo 3. Os resultados mais importantes, tais como a evolução da produção física, emissões e MAC, são apresentados dentro dos intervalos estatísticos resultantes da análise de Monte Carlo. A segunda seção dedica-se a analisar os cenários alternativos sob a luz da simbiose industrial. A última seção apresenta uma análise de sensibilidade e como os principais resultados variam com a alteração de um conjunto de variáveis de interesse.

4.1 CENÁRIO PRINCIPAL

A projeção da produção de aço e cimento é mostrada na Figura 15, com as faixas de distribuição geradas pela aplicação do método de Monte Carlo. A linha sólida representa a mediana das simulações em cada ano, a faixa mais escura representa 90% das simulações em torno da mediana (percentil-5% a 95%), a faixa mais clara representa os extremos inferiores e superiores de 5%.

Figura 15- Projeções da produção de aço (esquerda) e de cimento (direita) 2020-2050 e faixa de variação conforme método de Monte Carlo



Fonte: Elaboração própria.

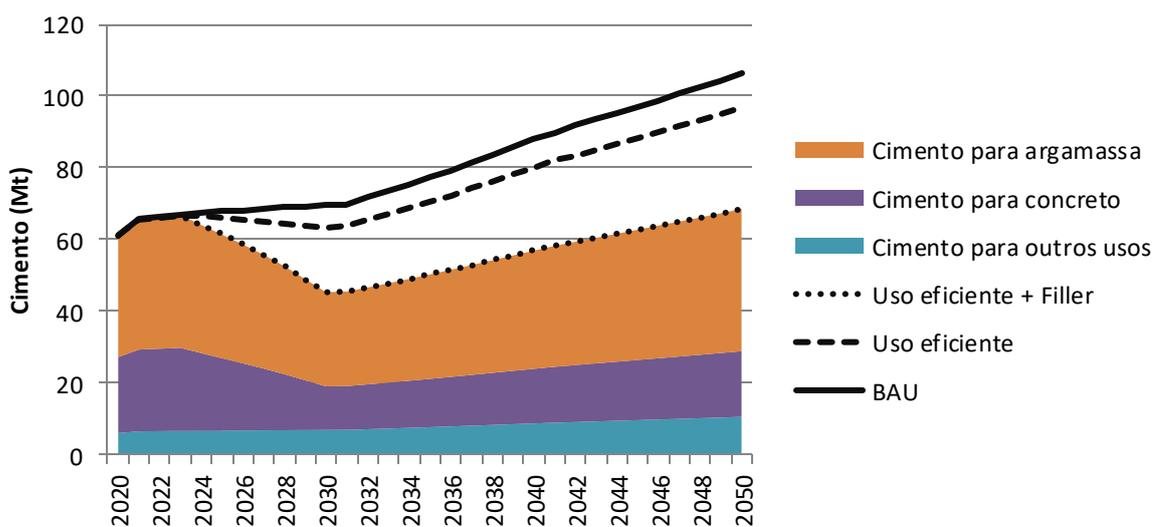
Na simulação mediana, a produção de aço cresce 4,6% a.a. do patamar de 2020, atingindo 125,5Mt em 2050, com uma variação de 92,6Mt no intervalo de 90% das simulações em torno da mediana. Já a produção de cimento cresce 1,7% a.a., atingindo 102,1Mt em 2050, com uma variação de 176,7Mt.

Apesar de a taxa de crescimento de cimento ser consideravelmente mais baixa, sendo que sua produção é ultrapassada por aço em 2038 na simulação principal, o método de Monte Carlo permite verificar que o desenvolvimento de cimento é mais sensível às variações no crescimento do PIB. Considerando somente as simulações no intervalo de 90% em ambos os setores, a produção de cimento é maior que a produção de aço no ano de 2050 em somente 17% das vezes.

A participação das exportações líquidas na produção de aço (2020-2050) varia entre 8% e 21% entre os percentis, com mediana de 12%. A exportação nesse período de projeção impacta o estoque doméstico de sucata disponível para o cenário de reciclagem, sobretudo nas categorias que possuem menor vida-útil.

Para o setor de cimento, existe uma alteração no cenário de produção no BC em relação ao BAU devido à eficiência material e parte da substituição por filler ocorrida na fase de uso do cimento na construção civil.

Figura 16- Redução da produção de cimento mediante desmaterialização na construção civil

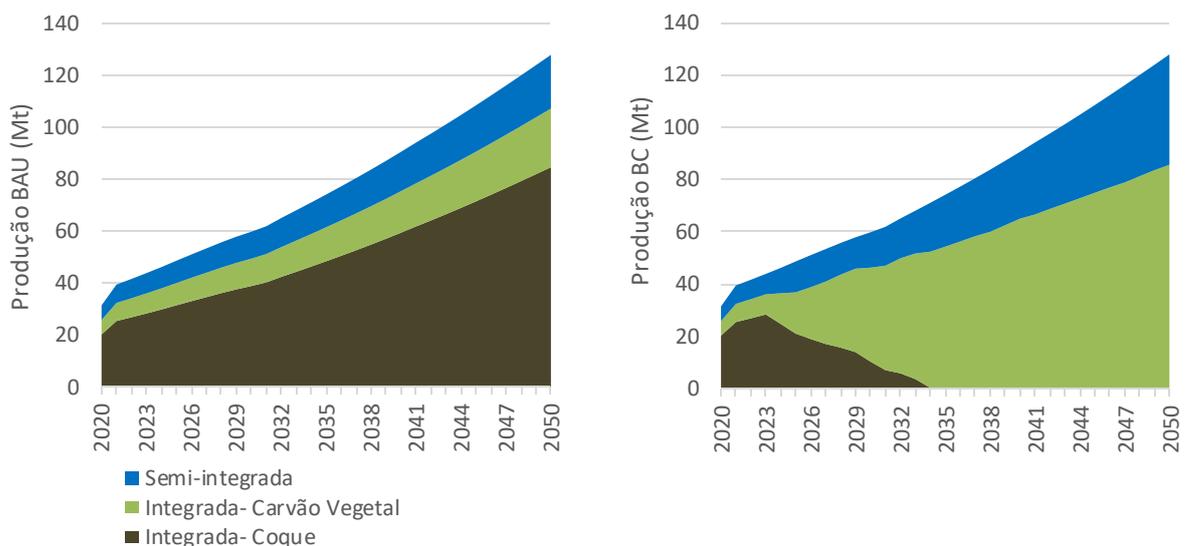


Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser observado na Figura 16 (simulação principal), a produção de cimento reduz-se de 106Mt para 69Mt em 2050 na simulação principal. A eficiência material por meio da industrialização do concreto e argamassa contribui com 25% da redução, o restante atribui-se à substituição por filler. Já em relação ao aço, a produção total se mantém inalterada do BAU para o BC, mas como existe uma mudança na representação de cada rota tecnológica, ocorre a diminuição da entrada de minério de ferro em 13%.

Como pode ser visto na Figura 17 (simulação principal), a produção de aço via coque, que no cenário BAU representaria 66% em 2050, cai para zero a partir de 2034 no cenário BC. Por sua vez, a produção via carvão vegetal aumenta de 18% para 67% e a produção via EAF aumenta de 16% para 33% em 2050.

Figura 17- Produção de aço por rota nos cenários BAU (esquerda) e BC (direita)



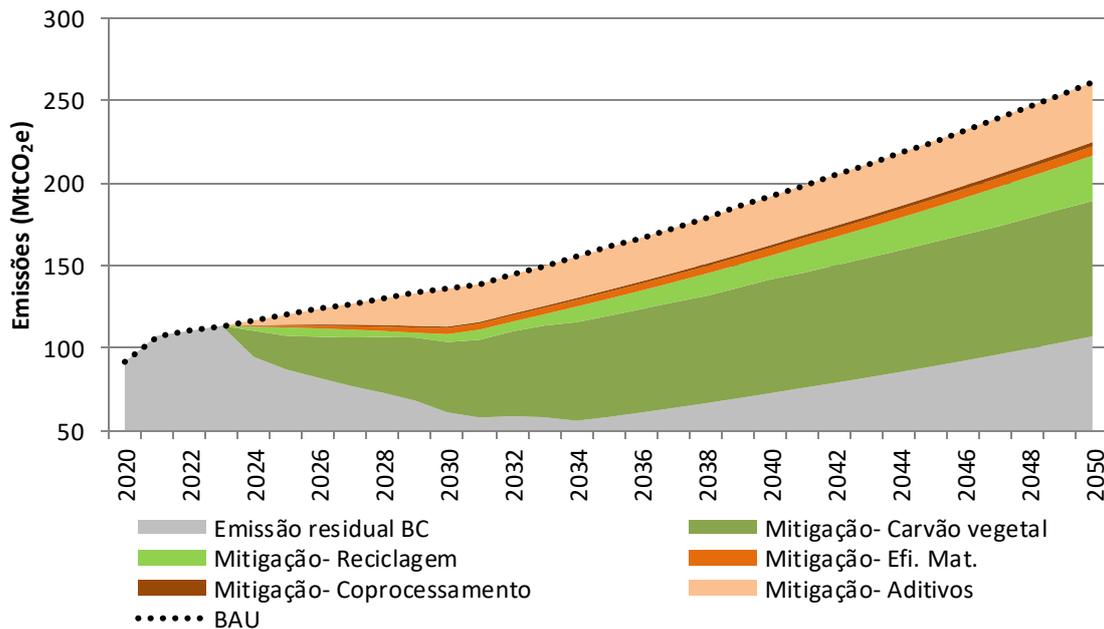
Fonte: Elaboração própria.

Por um lado, olhando para o limite atingível no percentil-95%, a penetração da reciclagem em 2050 poderia ser de apenas 44%, o que demonstra um potencial relativamente limitado. Por outro lado, o BES atinge o máximo valor com 87% de ocorrência, isto significa que toda a produção de aço pelo alto-forno pode ser sustentada por meio do carvão vegetal em mais de três quartos das simulações.

4.1.1 Emissões de CO₂ e demanda energética

A Figura 18 apresenta as emissões do cenário BAU e o potencial de redução atribuído a cada estratégia proposta ao longo do período de análise.

Figura 18- Evolução das emissões no cenário BAU e contribuição de cada estratégia de mitigação



Fonte: Elaboração própria.

Nota: Fatias em verde denotam as estratégias de aço, e em laranja denotam as de cimento.

Sobre a simulação principal, as emissões atingem 261MtCO₂e em 2050 no cenário BAU. Com o cenário de BC, esse mesmo valor poderia ser reduzido em 59%. Considerando todo o período, o cenário BC evitaria 2,75GtCO₂e. A alternativa de maior participação no potencial de mitigação é o carvão vegetal com 57%, seguido da substituição do clínquer pelas adições com 25%, reciclagem do aço com 13%, uso eficiente do cimento com 4% e, por último, o coprocessamento com 1%. A contribuição do coprocessamento é relativamente tão pequena que praticamente não é possível visualizá-la no gráfico da Figura 18.

Conforme o método de Monte Carlo, o carvão vegetal é a estratégia de maior potencial em 99% das simulações. A Tabela 15 apresenta os resultados referentes às emissões e ao potencial de redução em cada posição estatística.

Tabela 15- Emissões e potencial de redução sob o método de Monte Carlo

		Mínimo	Percentil-5%	Mediana	Percentil-95%	Máximo
Emissões BAU (MtCO₂e)	2050	76	145	256	403	599
	Período de análise	1.101	2.738	5.200	8.537	14.289
Potencial de redução em relação ao BAU	2050	15%	52%	59%	64%	70%
	Período de análise	18%	45%	52%	58%	64%
Participação das estratégias no potencial total de redução	Reciclagem	1%	7%	13%	23%	42%
	Carvão Vegetal	10%	44%	57%	67%	85%
	Eficiência Material	0%	3%	4%	5%	9%
	Adições	2%	18%	24%	31%	53%
	Coprocessamento	0%	1%	1%	2%	4%

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Os valores em uma mesma coluna não são comparáveis/somáveis, pois não se tratam da mesma simulação.

No percentil-95%, as emissões no cenário BAU chegam a 403MtCO₂e em 2050. Na mesma simulação¹³, o potencial de redução é de 57%. Já se o ponto de vista for o potencial de redução, no percentil-95%, é possível alcançar 64% de redução em 2050. Nessa simulação, as emissões no cenário BAU são 194MtCO₂e.

Destrinchando as emissões por fonte, observa-se que a eletricidade no setor de aço passa a ter importância significativa no ano de 2050, de 11% do cenário BAU para 61% no cenário BC, o que é esperado devido à alta intensidade elétrica da rota EAF. Já as emissões de processo reduzem de 82% para 25% em 2050. As emissões de processo remanescentes são basicamente as incorporadas no processo de produção e transporte do carvão vegetal.

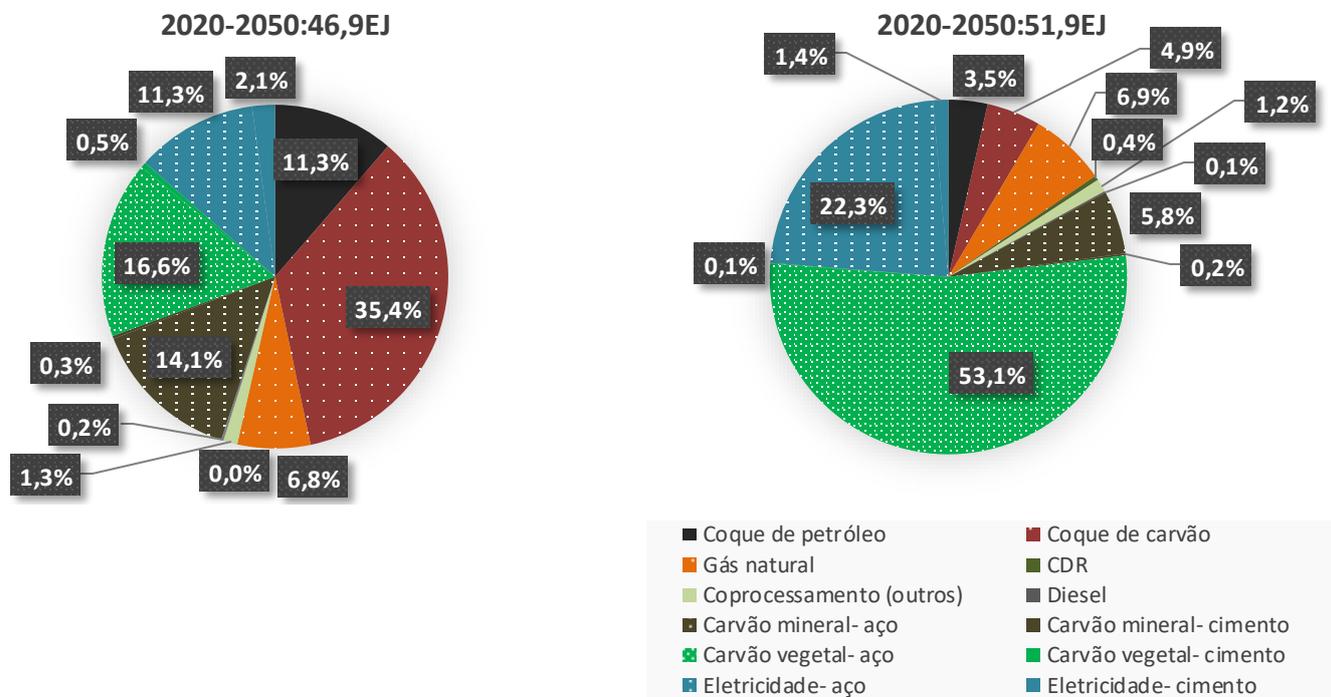
Para cimento, a eletricidade mantém uma baixa participação no total e não existe uma grande alteração na configuração das emissões do cenário BAU para o BC. Isto porque a substituição do clínquer, que tem a maior representatividade no potencial de mitigação, engloba tanto as emissões de processo como as de energia. Em 2050, as emissões de cimento são de 71% processo, 25% energia térmica e 4% de eletricidade no cenário BC.

Com relação à demanda final de energia, existe um aumento de 11% no montante total do cenário BAU para o cenário BC. Contudo, esse valor varia entre -15% e 22% entre os percentis, com o cenário BC apresentando poupança energética em 35% das simulações. O consumo de energia total no período do cenário BC vai de 25,2 EJ no percentil-5% até 76,0EJ no percentil-95%.

¹³ A “mesma simulação”, na prática, tratou-se da simulação imediatamente abaixo do percentil-95%, visto que este valor (403MtCO₂) é encontrado interpolando-se as simulações.

Como se observa na Figura 19 (simulação principal), a participação do setor de aço na demanda total em ambos os cenários é predominante. A redução mais expressiva do cenário BAU para o BC é a de coque de carvão (-85%) seguida por coque de petróleo (-65%). Já o aumento mais expressivo é o de carvão vegetal (254%). Enquanto a porção da eletricidade referente ao aço aumenta 117%, a referente ao cimento reduz 28%, culminando em um aumento líquido de 94%.

Figura 19- Demanda final de energia no cenário BAU (esquerda) e no cenário BC (direita) no período de análise



Fonte: Elaboração própria, 2022.

Nota: As fatias correspondentes a aço estão pontilhadas, e aquelas as correspondentes a cimento estão sem textura. O carvão mineral no setor de aço se refere ao uso direto no alto-forno, distinguindo-se do carvão usado para produção de coque de carvão.

4.1.2 Análise econômica

A Tabela 16 apresenta os custos de abatimento do cenário BC. A estratégia de maior custo-efetividade é justamente a de maior potencial, o carvão vegetal, seguida pela alternativa de reciclagem. Todas as estratégias para o setor de cimento apresentam MAC negativo, ou seja,

existe vantagem econômica na adoção das mesmas em relação ao cenário BAU. Considerando o cenário como um todo, o MAC médio é US\$ 11,76/tCO₂e.

Tabela 16- MAC das estratégias de baixo carbono na simulação principal

	MAC (US\$/tCO ₂ e)	Emissão Evitada (MtCO ₂ e)	Custo Total (milhões US\$)
Aço- Reciclagem	23,36	349	8.150
Aço- Carvão Vegetal	32,24	1.565	50.472
Cimento- Eficiência Material (1)	-68,39	109	-7.427
Cimento- Substituição do clínquer	-24,48	682	-16.688
Cimento- Combustíveis Alternativos	-54,25	41	-2.212
Total/MAC médio	11,76 (2)	2.745	32.294

Fonte: Elaboração própria.

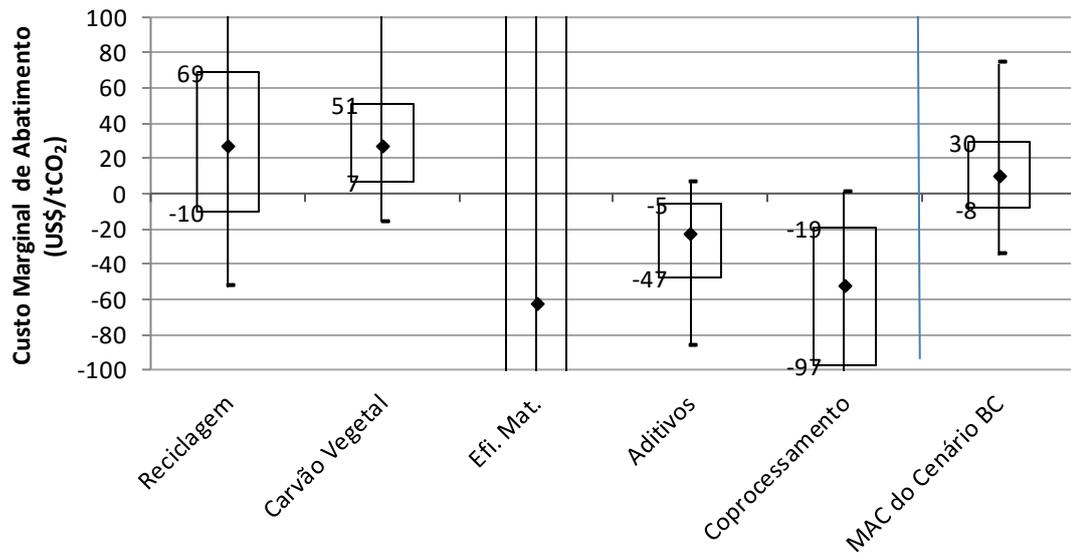
(1) Considerando-se as receitas no cálculo.

(2) Média ponderada das estratégias, ou seja, o custo total sobre a emissão total evitada.

Um caso especial é o MAC da estratégia de eficiência material. Como esclarecido no item 3.4.2, essa medida considera uma mudança de mercado que altera as receitas. Basicamente, existe mais lucro na venda de argamassa e concreto industrializado do que na venda de cimento para preparação em obra. Se as receitas fossem desconsideradas do cálculo, considerando o grande aporte de investimentos em novas fábricas, sobretudo para confecção de argamassa, o MAC da alternativa subiria para US\$ 27,42/tCO₂e, o que também alteraria ligeiramente o custo médio do cenário para US\$ 15,55/tCO₂e.

Além disso, o MAC de cada alternativa varia de acordo com as incertezas sobre as variáveis de custo e demais variáveis, o que foi incorporado no método de Monte Carlo e pode ser visualizado na Figura 20. Na mediana das simulações, o MAC da reciclagem se iguala ao do carvão vegetal, além de apresentar uma incerteza maior, visto que a variação entre percentis é superior.

Figura 20- MAC por estratégia e média do cenário BC mediante método de Monte Carlo



Fonte: Elaboração própria.

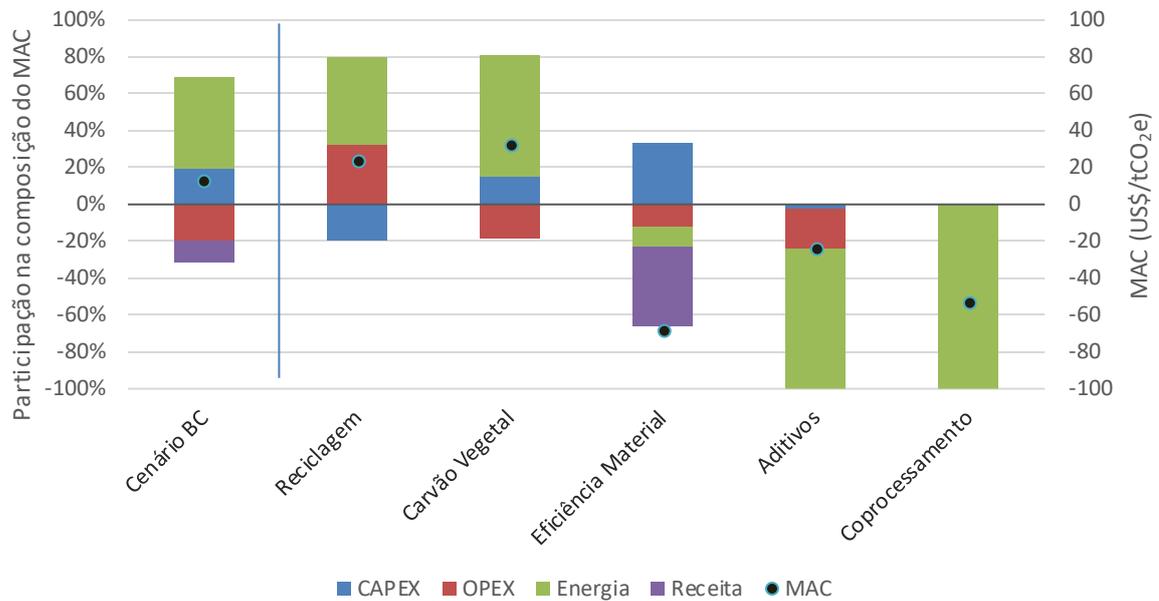
Nota: Losangos pontuam a mediana, caixas delimitam o intervalo de 90% das simulações em torno da mediana e as barras verticais delimitam o mínimo e o máximo.

Tanto a estratégia de carvão vegetal como a de adições no cimento apresentam-se com uma incerteza relativamente baixa comparada às demais estratégias no intervalo de 90% das simulações. A estratégia de eficiência material, por outro lado, extrapola os limites do gráfico na Figura 20. Como não houve variável randomizada especificamente relacionada a essa estratégia, infere-se que tamanha incerteza se deve a dois fatores: o primeiro é a projeção da produção de cimento (em função da variação do cenário de PIB) e a sensibilidade dessa estratégia ao volume de CAPEX; e o segundo é a reduzida participação na mitigação total, fazendo com que pequenas variações nesse potencial ao longo das simulações gerem grande variação no MAC, que é uma métrica relativa a este potencial.

À parte da alta incerteza do MAC da eficiência material, o MAC médio do cenário varia de US\$ -8/tCO₂e a US\$ 30/tCO₂e no intervalo de 90% em torno da mediana (US\$ 9,71/tCO₂e). Dentro deste mesmo intervalo, a chance do cenário BC gerar economia em relação ao BAU é de 15%.

Em relação à composição do MAC, é possível observar na Figura 21 qual a participação de cada componente de custo e se o efeito é de aumentar o MAC (porcentagem positiva) ou de reduzi-lo (porcentagem negativa). A soma das porcentagens em módulo é igual a 100%.

Figura 21- Discriminação dos custos (*breakdown cost*) da análise MAC



Fonte: Elaboração própria.

Nota: OPEX representa os custos operacionais excluindo a parcela de energia.

Pode-se concluir que o custo com energia tem participação majoritária no MAC médio e também nas estratégias individualmente, seja positivamente, caso do aço, seja negativamente, caso do cimento. Uma exceção é a estratégia de eficiência material, no qual o CAPEX representa 60% da parcela de custos (desconsiderando a receita).

O coprocessamento é a única estratégia que só possui a diferença de preços dos combustíveis como vetor de custo. Assume-se que não existe necessidade de adaptação dos fornos de cimento para a troca de combustíveis, e que os investimentos referentes ao pré-tratamento dos combustíveis alternativos estão embutidos nos preços dos mesmos. Os efeitos da variação do preço do CDR sobre o MAC da estratégia são apresentados no item 4.3.

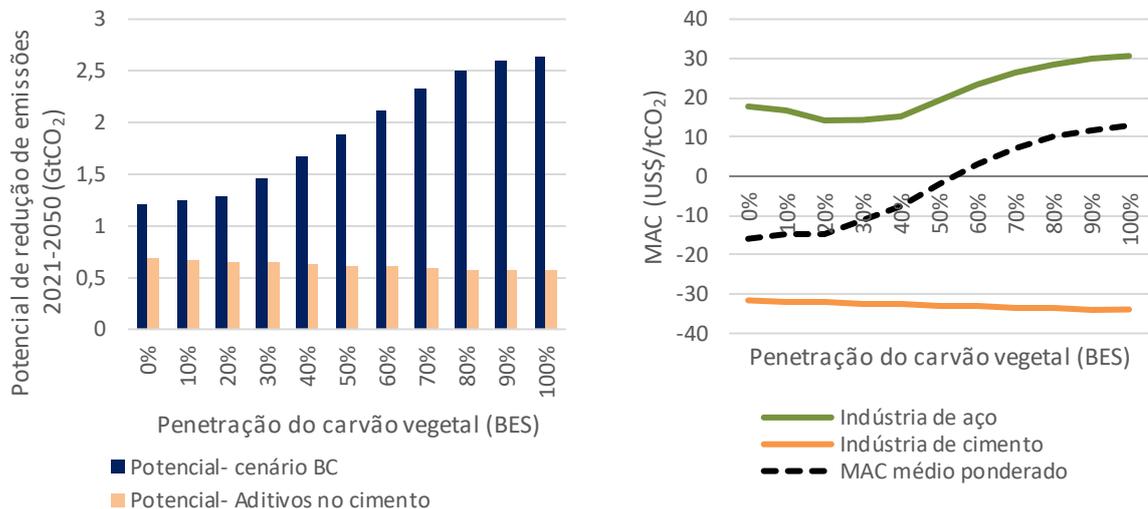
4.2 CENÁRIOS ALTERNATIVOS SOBRE A SIMBIOSE INDUSTRIAL

O objetivo desta análise foi averiguar como os resultados do modelo se comportam em relação a diferentes pressupostos da simbiose industrial, ou seja, os fluxos do setor de aço e do setor elétrico para o setor de cimento. Apesar do fluxo ocorrer em apenas um sentido, o setor de aço também ganha com a receita de venda da escória e também na partilha dos créditos de

carbono. Assim sendo, o caráter de ganho mútuo da simbiose industrial se confere a este sistema.

O primeiro item de análise foi a escória ácida, que é proveniente de alto-forno a carvão vegetal. O uso desse tipo de escória como ligante no cimento é limitado pela baixa razão de CaO-SiO₂, e estudos a esse respeito não têm sido comuns (CADORE; ANGULSKI DA LUZ; FARIAS DE MEDEIROS, 2019). Deste modo, investigou-se como o potencial de redução e os custos variam conforme a penetração do carvão vegetal, em um cenário onde o uso da escória ácida não é viabilizado.

Figura 22- Efeitos da penetração do carvão vegetal sobre o potencial de mitigação (esquerda) e custos (direita) em um cenário sem o uso da escória ácida



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 22 (esquerda) revela que, de 0% a 100% de penetração do carvão vegetal no alto-forno, o potencial total aumenta em 1,4GtCO₂, mesmo que o potencial específico das adições no cimento se reduza em 117MtCO₂. Já em relação aos custos (mesma figura, direita), o MAC para o setor de aço mostra um valor mínimo de US\$14/tCO₂ com 30% de penetração do carvão vegetal, o MAC se eleva até US\$31/tCO₂ com 100% de penetração. Simultaneamente, o setor de cimento apresenta uma leve redução contínua do MAC de 0% a 100% de penetração, que está mais associada à redução do potencial de mitigação, dada a redução do montante total de adições, do que a um efeito sobre os custos absolutos, os quais praticamente não sofrem alteração. Ressalta-se que o preço da escória adotado no modelo é maior (basicamente o dobro) que o das cinzas volantes, porém mais baixo que o do filler

calcário. O MAC médio ponderado do cenário atinge equilíbrio com 54% de penetração do carvão vegetal.

O segundo item, as cinzas volantes, foi analisado através dos cenários alternativos sobre o crescimento econômico e o perfil do setor elétrico, que determina a disponibilidade deste substituto do clínquer. A Tabela 17 apresenta os resultados dos seis cenários para a simulação principal e a Figura 23 apresenta os desempenhos (emissões *versus* custos) destes mesmos cenários com a aplicação do método de Monte Carlo.

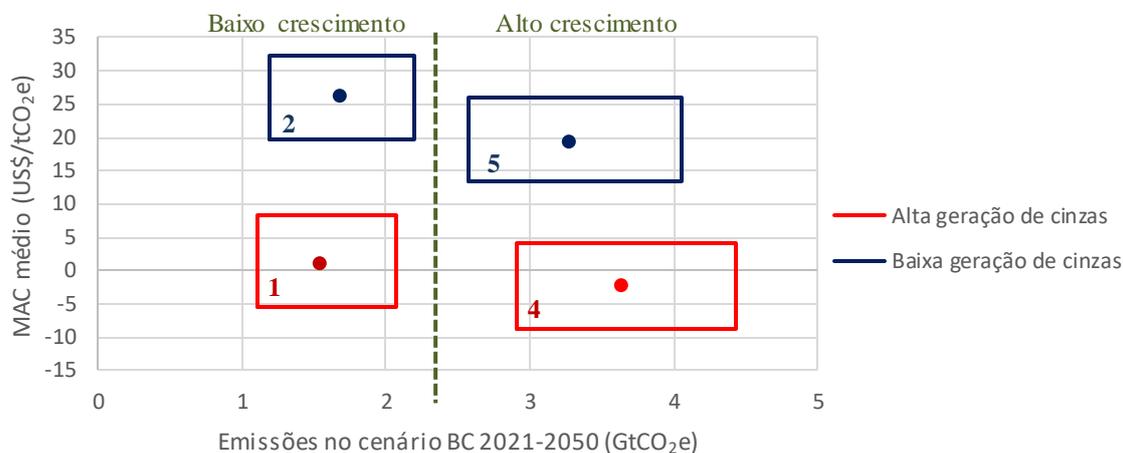
Tabela 17- Cenários alternativos sobre a simbiose industrial

		Emissões 2021-2050 (GtCO ₂ e)											
		Oferta de adições em 2050 Cenário BC (Mt)			Emissões BAU			Emissões BC			Participação da eletricidade na emissão residual do BC	Participação da estratégia de adições no potencial total	MAC médio do cenário BC (US\$/tCO ₂)
	Cenário	Escória	Cinzas volantes	Aço	Cimento	Total	Aço	Cimento	Total				
Baixo crescimento	1	12	75	1,7	1,5	3,2	0,9	0,7	1,6	20,1%	38,6%	3,31	
	2	12	-	1,7	1,5	3,2	0,7	1,0	1,7	7,9%	19,3%	28,72	
	3	12	-	1,6	1,5	3,1	0,7	1,0	1,7	7,9%	20,4%	16,43	
Alto crescimento	4	53	75	5,2	2,7	7,8	2,5	1,1	3,6	28,5%	29,1%	-3,42	
	5	53	-	5,2	2,7	7,8	1,8	1,6	3,4	11,0%	17,1%	19,34	
	6	53	-	4,9	2,7	7,6	1,8	1,6	3,4	11,0%	18,2%	6,60	

Fonte: Elaboração própria.

A análise mostra que os cenários 1 e 4 têm o melhor custo-efetividade (Figura 23, eixo Y). Isso significa que, tanto no cenário de menor como no de maior crescimento, um perfil de grid firmado em termoeletricas a carvão resultam, devido aos menores preços da eletricidade (vide Tabela 11), em um MAC menor para o cenário BC aço-cimento do que os cenários 2 e 5, nos quais a geração elétrica é baseada em renováveis. Valores de MAC intermediários foram encontrados para o cenário 3 e 6 (omitidos da Figura 23 para melhor interpretação). Esses cenários assumem que um grid baseado em energia renovável é implementado independentemente do cenário BC aço-cimento e, como a MAC é calculado de forma incremental, seus custos são intermediários entre os cenários de baixa e alta geração de cinzas.

Figura 23- Desempenho dos cenários alternativos sob método de Monte Carlo



Fonte: Elaboração própria.

Nota: Pontos representam a mediana das simulações de Monte Carlo, caixas delimitam o intervalo entre o primeiro e o terceiro quartil. Os números dentro das caixas correspondem aos cenários da Tabela 17.

Em relação ao menor nível de emissão (Figura 23, eixo X), ocorre uma significativa sobreposição entre os cenários 1 e 2 (baixo crescimento) e entre os cenários 4 e 5 (alto crescimento) no intervalo entre o primeiro e terceiro quartil. Esse sobreamento torna incerta uma conclusão a respeito do melhor cenário de mitigação, mesmo assim é possível observar duas tendências. Para o grupo de menor crescimento (1-3), a maximização da simbiose industrial (cenário 1) apresenta o menor nível de emissão. Nesse cenário, a estratégia de substituição de clínquer representa 39% do potencial total de redução e as emissões advindas do consumo elétrico representam 20% das emissões residuais do BC (valores da simulação principal, Tabela 17). Para o grupo de maior crescimento (4-6), a descarbonização do grid (cenário 5) é mais promissora, mesmo reduzindo a simbiose industrial entre os setores elétrico e de cimento. Quando comparado o cenário 4 ao cenário 1, que representam a máxima simbiose industrial, a estratégia de substituição de clínquer passa a ser menos relevante, enquanto as emissões do consumo elétrico se elevam, ambos passam a ter aproximadamente 29% de representação (Tabela 17).

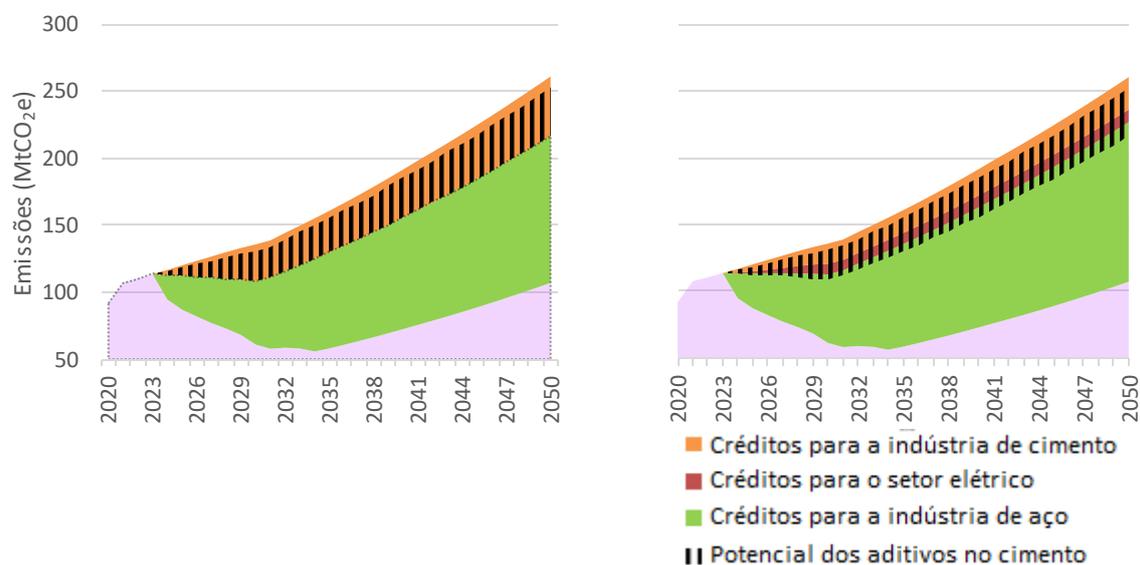
É importante fazer duas considerações sobre os resultados da Figura 23. Primeiro, altos preços da eletricidade afetam não só o MAC das estratégias, como também reduz a penetração do carvão vegetal, já que a mesma é em função de viabilidade econômica. Mesmo assim, esses efeitos não foram o suficiente, no grupo de alto crescimento econômico, para fazer com que a

eletricidade de baixo custo (cenário 4) fosse melhor que a eletricidade de baixo carbono (cenário 5) em termos de emissão.

A segunda consideração é que, devido ao escopo do estudo, o modelo não considera as emissões do sistema elétrico nacional como um todo. Ao realizar uma estimativa com os valores do estudo de referência (PEREIRA et al., 2015), conclui-se que a transição de um grid baseado em carvão para um baseado em energia renovável evitaria cerca de 5GtCO_{2e} até 2050. Esse valor torna insignificante a vantagem de 0,1GtCO_{2e} que o cenário 1 tem sobre o cenário 2. Portanto, estendendo o escopo de emissões, um grid sem termoeletricas a carvão é melhor em todos os casos analisados.

A análise sobre a simbiose industrial também gerou resultados sobre a alocação do potencial de redução, e de possíveis créditos de carbono, entre os setores com relação à estratégia de substituição do clínquer.

Figura 24- Alocação dos créditos de carbono da substituição de clínquer pela ótica do implementador (esquerda) e pela ótica do fornecedor de adições (direita)



Fonte: Elaboração própria.

Conforme apresenta a Figura 24, em um extremo, se o potencial da estratégia for totalmente alocado ao agente implementador, ou seja, o setor de cimento, ele seria detentor de 831MtCO_{2e} evitadas, 30% do potencial total do cenário. No outro extremo, se a mitigação da substituição do clínquer devido ao uso de escória e de cinzas fosse totalmente alocada ao setor de aço e elétrico, respectivamente, 24% e 30% do potencial da medida, os créditos do setor de

cimento decairiam para 462MtCO₂e. O setor de aço ampliaria seu potencial de 1,9GtCO₂e para 2,1GtCO₂e, e o setor elétrico receberia 207MtCO₂e dos créditos.

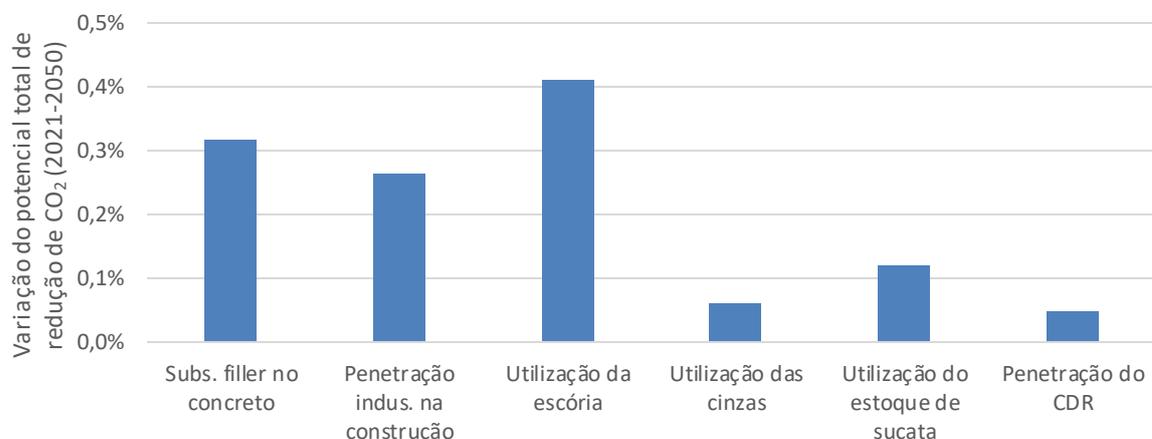
O MAC médio do setor de aço na simulação principal é de US\$30,62/tCO₂e. Se for considerada a receita incremental da venda de escória, US\$ 794 milhões (VPL 2020), haveria uma ínfima redução do MAC médio para US\$ 30,21/tCO₂e. Já se o CO₂ evitado pelo uso da escória for alocado para aço conforme o parágrafo anterior, o MAC médio seria de US\$ 27,85/tCO₂e.

Observando-se os preços correntes de venda e os FEs adotados no estudo, os preços atuais dos créditos seriam de US\$14/tCO₂ para escória e US\$8/tCO₂ para cinzas. Esses valores não são incrementais, isto é, desconsideram a diferença com o preço do clínquer.

4.3 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

A Figura 25 permite ver que o potencial do cenário BC, avaliado em 2,75GtCO₂e no período de análise, tem maior sensibilidade à utilização da escória quando comparado às demais variáveis, com um aumento de 0,4% do potencial com 10% a mais de escória. Porém, em linhas gerais, as variáveis analisadas, que seriam as mais importantes para o resultado global do modelo, apresentaram efeitos muito baixos (inferior a 1%) sobre o potencial total.

Figura 25- Sensibilidade do potencial total de mitigação mediante 10% de aumento nas variáveis de entrada

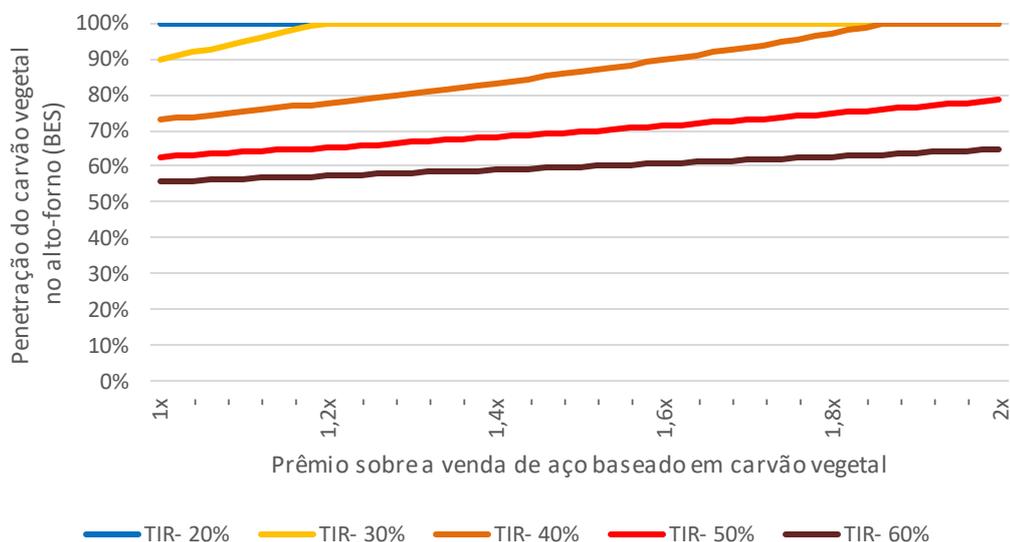


Fonte: Elaboração própria.

As variáveis relacionadas ao BES deveriam ter, a princípio, o maior impacto sobre o potencial total, em vista do carvão vegetal ser a estratégia de maior representatividade, mas elas não são apresentadas na Figura 25 porque não geraram efeito com 10% de variação. Essa contradição ocorre porque o BES já atinge o valor máximo na simulação principal, dado à diferença de custo entre as rotas via coque e via carvão vegetal e a receita do aço, conforme as fontes utilizadas. Portanto, o aumento de 10% da taxa de atratividade ou do prêmio do aço baseado em carvão vegetal não modificou sua penetração, conseqüentemente o potencial de mitigação permanece inalterado.

Porém, se analisado separadamente, observa-se uma variação do BES em função do prêmio se a taxa de atratividade for maior que 26% de TIR. Para a análise principal, assumiu-se uma meta de 15% para a TIR, valor que garante uma penetração viável de 100% de carvão vegetal, segundo o modelo, sem a necessidade de um prêmio adicional. Dentro do modelo BES, a participação viável de carvão vegetal no alto-forno é diretamente relacionada ao prêmio sobre a venda de “aço verde” (proveniente de carvão vegetal) e inversamente relacionada à meta da TIR.

Figura 26- Variação do BES: prêmio sobre o aço *versus* taxa de atratividade



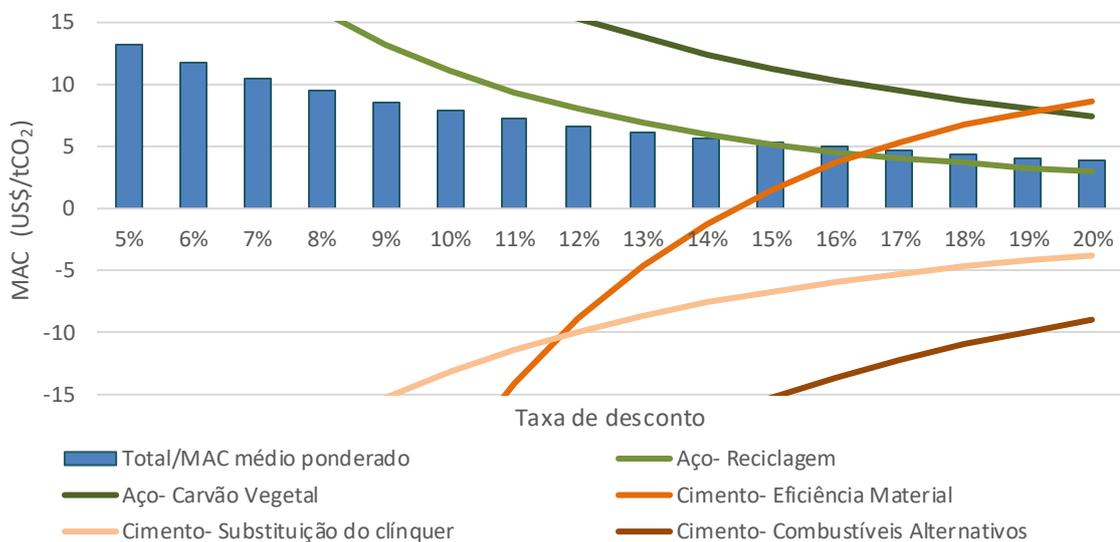
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 26, o prêmio do aço verde é apresentado como uma proporção ao preço de mercado do aço, com 1x significando igualdade de preços entre o aço verde e o aço comum. Grifa-se que essa análise de sensibilidade considera constantes os custos de produção de aço por cada rota e o preço médio de venda do aço, já apresentados nas subseções 3.4.1 e 3.2.3.3.

O gráfico mostra que, quando a meta da TIR é menor que 50%, mais especificamente 42%, é possível alcançar 100% de viabilidade do carvão vegetal sem precisar dobrar o preço do aço verde.

Dando seguimento, são apresentadas análises de variação para resultados específicos, como a variação do MAC conforme a taxa de desconto adotada (Figura 27). Observa-se que os MAC tendem a se estabilizar conforme se aumenta a taxa de desconto. O MAC médio do cenário BC diminui conforme o aumento da taxa de desconto, o que se associa em grande parte à redução do MAC do carvão vegetal.

Figura 27- Variação do MAC mediante a taxa de desconto



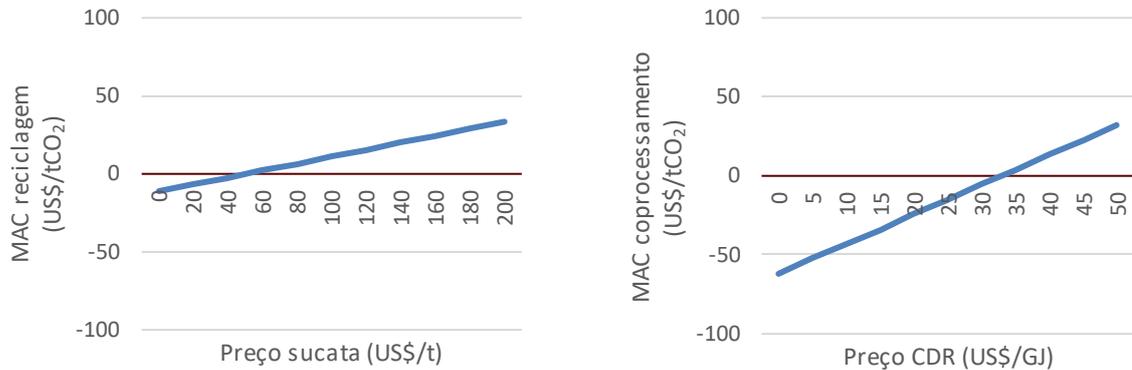
Fonte: Elaboração própria.

Generalizando, os MAC das estratégias para o setor de cimento tendem a aumentar com a taxa de desconto, sendo o contrário para as estratégias do setor de aço. Esse retrato poderia ser explicado em partes pela representação do CAPEX, que é a componente mais sensível à taxa de desconto, em cada estratégia. Isto é coerente, quando se observa a maior inclinação da curva da eficiência material (Figura 27) e a participação do CAPEX nesta estratégia (Figura 21), sendo a única a trocar de MAC negativo para positivo dentro do intervalo avaliado.

Dado a alta incerteza sobre o preço da sucata e o preço do CDR, vale observar como o MAC da reciclagem e o do coprocessamento variam respectivamente de acordo com a variação de preço desses insumos. A Figura 28 mostra que, para que respectivamente o MAC da reciclagem e do coprocessamento sejam negativos, o preço máximo da sucata deve ser US\$ 49/t e o do CDR deve ser US\$ 33/GJ. Ambos os casos apresentam relação linear direta entre

insumo e MAC, e a elasticidade é de 0,22 no caso da reciclagem e 1,88 no caso do coprocessamento.

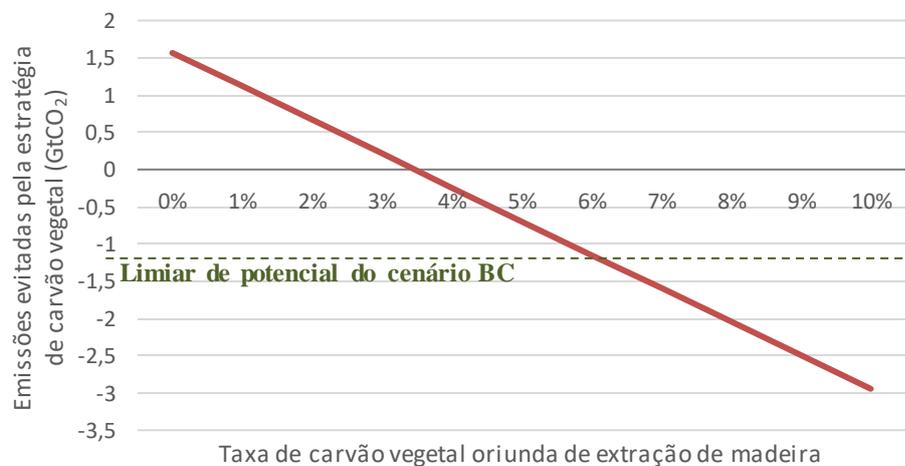
Figura 28- Elasticidade do MAC da reciclagem (esquerda) e do coprocessamento (direita) ao preço dos insumos



Fonte: Elaboração própria.

Certamente, a reciclagem também é sensível ao preço da eletricidade. Nesse caso, a elasticidade do MAC em relação ao preço médio da eletricidade é de 0,53. Os demais MAC, com exceção do coprocessamento, também sofrem variação mediante esse preço. A elasticidade do MAC médio do cenário BC é 0,22.

Figura 29- Redução do potencial de mitigação do carvão vegetal conforme aumento do desmatamento



Fonte: Elaboração própria.

Por último, um fato que chama a atenção é como o potencial da medida de carvão vegetal pode ser comprometido se a sustentabilidade da madeira não for garantida no futuro. A Figura 29 alerta que, se somente 1% do carvão vegetal utilizado no alto-forno for oriundo de desmatamento ao longo do período de análise, o potencial da estratégia se reduziria em quase um terço. Acima de 3,5%, a estratégia passa a apresentar potencial negativo, em outras palavras, seria emitido mais CO₂ com tal estratégia do que se continuasse a ser usado o coque para produção de aço. 6% de carvão advindo de desmatamento seria o suficiente para anular todo o potencial de redução de CO₂ do cenário de BC.

5 DISCUSSÕES

Este capítulo expõe as interpretações dos resultados do modelo, buscando conexões e contrastes com outros estudos, e fornecendo recomendações com base nos resultados.

5.1 SOBRE A EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO FÍSICA DE AÇO E CIMENTO

A expectativa da produção de aço e cimento, até 2050, se adequa ao início da presente discussão, visto que a projeção física exerce influência sobre todo o modelo.

As saídas do modelo econométrico acabaram por apresentar características não esperadas inicialmente, como o fato do crescimento não ter ponto de inflexão dentro do período de análise. Para ambos os setores, a produção cresce sem tendência de se estabilizar antes de 2050, diferente do que outros estudos projetaram (a exemplo, van Ruijven et al. (2016) e Rootzén e Johnsson (2013)). Mesmo assim, no caso de cimento, o nível projetado para 2050 é inferior ao cenário de baixa demanda do *Roadmap* do cimento, 106Mt contra 127Mt (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2019).

Em 2050, o consumo per capita de cimento seria de 455kg, o que situaria o Brasil em um patamar pouco abaixo do que em 2019 se encontrou o Egito, com 482kg per capita (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2020). Com relação ao aço, o consumo de 510kg per capita em 2050 está entre os níveis do Japão, 443kg, e da China, 720kg, em 2020 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

De fato, a relação entre consumo e PIB per capita varia grandemente entre países, o que torna comparações desse tipo pouco relevantes para validar projeções de demanda. Por exemplo, a China tem apresentado os maiores níveis de demanda de aço (720kg/hab. em 2020) e cimento (1.723kg/hab. em 2019) em relação ao seu PIB per capita, em torno de US\$ 16 mil. Já o México e o Brasil, que apresentaram valores de PIB per capita bem próximos aos da China nesses anos, tiveram valores de demanda de aço e cimento expressivamente inferiores. Essas comparações são feitas observando os dados do Instituto Aço Brasil (2021), Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2020) e Banco Mundial (2021).

A complexidade envolvendo projeções baseadas em econometria, e o nível de saturação de demanda específico de cada país, faz com que tais análises mereçam estudos a parte. Para

os objetivos do presente estudo, avaliam-se as projeções de aço e cimento como estando dentro de limites plausíveis no horizonte de tempo analisado. Os cenários BC tiveram caráter exploratório e não prescritivo, ou seja, buscaram compreender as alternativas de mitigação dentro de possíveis futuros, com as incertezas da projeção sendo contempladas dentro dos intervalos amostrais fornecidos pelo método de Monte Carlo.

5.2 SOBRE RECICLAGEM *VERSUS* CARVÃO VEGETAL: POTENCIAIS, CUSTOS E LIMITANTES NA PRODUÇÃO DE AÇO

A análise revelou a existência de limitantes diferentes para cada estratégia de economia circular associada ao cenário BC. Resumidamente, no caso da reciclagem, o potencial é limitado pela demanda passada e futura por produtos de aço. No caso do carvão vegetal, o potencial não é, a princípio, limitado por fatores de disponibilidade, porém fatores econômicos determinam a penetração desta rota produtiva.

Aprofundando-se na reciclagem, é notável que a demanda brasileira de aço ainda precisa atingir um pico, como vem sendo observado em países desenvolvidos, de forma que o estoque de sucata, que está sempre em defasagem em relação à demanda, possa atingi-la. A porção da produção de aço que é exportada também impede a manutenção dos recursos de aço secundário no Brasil. Exportações já foram apontadas como barreiras à circularidade do aço a nível nacional por estudos anteriores (PAULIUK et al., 2017).

Além disto, mesmo o modelo SAAM adaptado incorporando a possível mudança nos padrões de consumo conforme evolução da população brasileira, sugere-se que produtos da construção civil ainda farão parte expressiva (cerca de 31%) na destinação de aço até 2050. Essa classe de produtos possui, ao mesmo tempo, o maior tempo de vida útil, média de 50 anos, e a menor taxa de recuperação de sucata, média de 48% no período contra, por exemplo, 89% de recuperação para transportes. Todos esses fatores somados contribuem para o reduzido estoque de sucata, que permitiria a reciclagem contribuir somente com 44% da produção total de aço bruto nas simulações mais otimistas (percentil-95%).

A penetração da reciclagem do aço resultou no seu menor potencial de redução de CO₂ em comparação com a alternativa de carvão vegetal, mesmo que o FE específico dessa rota seja inferior: no cenário cujo SIN atinge 275gCO₂e/kWh, a emissão específica por tonelada de aço no EAF é 79kgCO₂e mais baixa do que no alto-forno com carvão vegetal; no cenário em que o

SIN é mais baixo, $57\text{gCO}_2\text{e/kWh}$, essa diferença é ainda maior, $188\text{kgCO}_2\text{e}$ menos emissivo. Importante frisar que, mesmo que não haja investimentos para um setor elétrico de baixo carbono até 2050, dentro dos cenários considerados, o FE do SIN permanece abaixo do que o assumido para outros países, como a China: $0,77\text{kgCO}_2\text{/kWh}$ (ZHANG et al., 2018). Portanto, comparado ao resto do mundo, o Brasil mantém vantagem ao apostar em EAF, segundo o balanço de carbono.

Já sobre os custos da reciclagem, a maior variação do MAC ao longo das simulações (vide Figura 20) sugere que existe mais incerteza com relação à diferença entre os preços dos insumos de aço (minério vs. sucata) do que entre os preços da energia (coque vs. carvão vegetal).

Passando para o carvão vegetal, o modelo revelou um grande peso do desmatamento sobre o potencial da estratégia (vide Figura 29). Certamente, é necessário fazer a distinção entre a extração ilegal de madeira, comumente chamada por desmatamento, e a extração legalizada. A exploração “sustentável” de floresta nativa pode ocorrer quando a taxa de extração for menor que a taxa de reposição natural da biomassa. Entretanto, um estudo mostrou que o volume permitido pelo Código Florestal Brasileiro, de $30\text{m}^3\text{/ha}$, não é o suficiente para garantir a recuperação total da floresta nativa em longo prazo (NUMAZAWA et al., 2017).

O requerimento de carvão vegetal no cenário proposto não deveria gerar pressão sobre as taxas de desmatamento, visto que, no percentil-95%, a área máxima requerida seria de $23,1\text{Mha}$ e a disponibilidade a nível nacional é de $67,3\text{Mha}$. Entretanto, o mesmo estudo utilizado como referência da disponibilidade de terra (PIKETTY et al., 2009) aponta para uma série de condicionantes institucionais, econômicos e de direito da terra, bem como *trade-offs* a nível regional, que podem afetar a pressão pelo desmatamento. Os estados de Mato Grosso e Tocantins foram ranqueados com os maiores potenciais técnicos, porém foram avaliados com elevado custo da terra e produtividade média para baixa. Por outro lado, Minas Gerais, onde se localiza parte expressiva da capacidade do aço, tem classificação mediana em todos os fatores, com exceção do fator produtividade, que é alto (PIKETTY et al., 2009). Minas Gerais concentrou 32% da produção nacional em 2019 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020a), porém o potencial energético de carvão vegetal para esse estado é 11% do total nacional, segundo o modelo.

Norgate e Langberg (2009) já indicaram que, em um cenário de grande potencial de área a nível nacional, o custo de transporte do carvão vegetal até as fábricas de aço é uma das questões de maior peso. No presente modelo, assume-se que as unidades de carvão vegetal se encontrarão próximas (cerca de 16km) às usinas de aço, mas se verificou que o MAC do carvão vegetal aumenta cerca de $\text{US\$ } 3/\text{tCO}_2\text{e}$ para cada 100 km de distância adicional. A questão

logística deve ser contemplada no planejamento da localização das futuras usinas de aço baseadas em carvão vegetal, pois está diretamente relacionada aos custos e aos impactos ambientais desta rota.

Através de uma análise paralela, constatou-se que, em um cenário de compensação das emissões da siderurgia através de reflorestamento por espécies nativas, a intensidade de uso de terra seria menor, $38\text{m}^2/\text{tCO}_2$, do que em um cenário de transição energética para o carvão vegetal, $51\text{m}^2/\text{tCO}_2$ (SOUZA; PACCA, 2021a). A mesma análise apontou, entretanto, que se o modelo for estendido alguns anos além do horizonte de 2050, o cenário de transição energética torna-se mais sustentável, visto que a demanda adicional de terra só ocorreria pelo crescimento marginal da produção de aço, enquanto que novas áreas para reflorestamento seriam continuamente necessárias como sumidouro (estoque permanente) para as emissões de carbono da siderurgia.

Em fechamento desta subseção de discussão, outro ponto constatado na presente análise é o papel do CAPEX tanto para reciclagem como para carvão vegetal. Dado a atual capacidade ociosa de aço (mais de 60% em 2020), especialmente aço primário (alto-forno a coque), os investimentos acabam sendo muito maiores no cenário BC na transição para EAF e carvão vegetal, mesmo sendo mais barato em termos de custo por tonelada de aço investir nessas duas rotas. É por isso que, quanto maior for a estimativa do crescimento da produção de aço até 2050, a tendência é que os MAC da reciclagem e do carvão vegetal se reduzam, pois, a necessidade de um grande aporte de investimentos em novas fábricas já existiria no BAU.

5.3 SOBRE A ABORDAGEM DA DEMANDA PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ DO CIMENTO

A partir da análise, constatou-se que a eficiência material não possui um potencial expressivo diante das demais estratégias (vide Tabela 15). A redução específica do uso de cimento é de 26% para concreto (industrialização mais misturador), porém somente 8% para argamassa. Contrariamente, a participação do concreto na destinação final do cimento é em média somente 35% e da argamassa é 55%, resultando em uma média ponderada de 14% de redução do uso de cimento.

Se, por um lado, a abordagem da demanda possui uma contribuição reduzida no que condiz à eficiência material por intermédio da industrialização, por outro lado, tem uma

contribuição relativamente importante na substituição de clínquer: 23% do potencial de substituição do clínquer no cimento ocorre na fase de consumo.

Desta forma, pode-se concluir que a abordagem da demanda, com estratégias focadas no uso de cimento na construção civil, amplia o potencial de mitigação do setor de cimento em 43%, comparado a um cenário somente sob a abordagem da produção. Este valor é relativamente próximo ao de 56% encontrado por Reis et al. (2021), quando comparado o potencial do cenário LC2 (abordagem do consumo) com o do cenário LC1 (abordagem da produção) para o período completo de análise. Uma vez que as premissas adotadas são bastante semelhantes entre os estudos, aqui o valor acaba sendo menor provavelmente pela inter-relação entre as estratégias no modelo: se não há redução da demanda de cimento na construção civil, acaba havendo maior janela para redução das emissões pelo coprocessamento e pela substituição de clínquer na fase de produção do cimento.

Cabe salientar que estratégias de circularidade sob a abordagem da demanda não foram avaliadas para o setor de aço no presente estudo. Entende-se que, assim como no caso de cimento, estratégias focadas na demanda de aço aumentariam o potencial de mitigação, porém existem maiores barreiras para implementação das mesmas no contexto brasileiro. Para elucidar essa afirmação, pode-se tomar como exemplo o relatório “*Mission Possible*” (ENERGY TRANSITION COMMISSION, 2018), que colocou o compartilhamento de carros como estratégia fundamental para redução da demanda de aço no setor de transportes. Entretanto, se prevê que essa estratégia seja efetiva junto com a eletrificação da frota de veículos. Ocorre que o mesmo relatório apontou que uma das maiores dificuldades à eletrificação em países como Brasil e Índia é o alto nível de perda de eletricidade na rede.

De modo geral, a implementação de estratégias sob a ótica de consumo nas cadeias produtivas requer ações mais amplas, políticas para regulamentação de mercado e melhorias de infraestrutura a nível nacional. Portanto, essa ótica é mais desafiadora que a da produção, apesar de que mais estudos têm a incorporado em seus cenários. Tal tendência se associa à adoção da economia circular na área de baixo carbono.

5.4 SOBRE A SIMBIOSE INDUSTRIAL E ALOCAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO ENTRE SETORES

Os resultados do modelo também permitem discorrer sobre a distribuição dos créditos de carbono da estratégia de substituição de clínquer entre os setores de cimento, de aço e elétrico. Peculiarmente, o modelo resultou em um MAC médio positivo para o setor de aço e negativo para o setor de cimento englobando 94% das simulações. Significa que a alocação dos créditos referentes à aplicação de escória é relevante para um possível balanceamento de custos de mitigação entre os dois setores.

Reiterando que o potencial de cinzas e de escória dependem de questões técnicas e normativas. No *Roadmap* do cimento (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2019), foi estimado que as cinzas atingiriam uma produção de 3,3Mt em 2050, no presente estudo esse valor é no mínimo 49,3Mt (percentil-5%), assumindo que a matriz elétrica terá participação relevante de termoeletricas a carvão mineral. Em relação à escória, o *Roadmap* considerou uma produção de 24Mt em 2050 somando os três tipos de escória (de alto-forno, ácida e de aciaria), e uma utilização de 17,5Mt, sendo aproveitado somente cerca de um terço da escória ácida e de aciaria. No presente estudo, avaliou-se o potencial de disponibilidade de escória em 36,6Mt na mediana das simulações. Essas diferenças se devem aos pressupostos considerados aqui a respeito do setor elétrico e da utilização da escória ácida (do carvão vegetal), porém outras possibilidades para esses pressupostos foram contempladas no item 4.2.

Foi observado que a maior participação do carvão na geração elétrica culminaria em menores valores de MAC ponderado, entretanto, sob a visão dos formuladores de políticas, esse cenário não é vantajoso em termos de mínima emissão de CO₂, se comparado a um cenário de alta participação de energia renovável no grid que abasteceria a futura demanda elétrica no Brasil. Já sob a visão das companhias de aço e de cimento, que não possuem controle sobre a geração no SIN, valeria a pena o investimento em geração renovável localizada (como eólica e solar) para atender a alta demanda elétrica da produção de aço no cenário BC, enquanto a simbiose industrial é mantida com as termoeletricas a carvão conectadas ao grid.

A análise da simbiose industrial também auxiliaria na proposição de uma norma brasileira de baixo carbono, similar a estudos feitos para aço (FELDMANN; KENNEDY, 2021) e cimento (FRANSEN et al., 2021) nos Estados Unidos, que também pontuam a possibilidade de um comércio de créditos de carbono entre programas de mitigação para aço e cimento. Esses trabalhos destacam o estabelecimento de *benchmarks*, expressos em intensidade de carbono dos

produtos, como referencial da compra ou venda de créditos de carbono. O presente cenário BC demonstra a redução da intensidade de carbono, ao longo do período de análise, de 1,74tCO₂ para 0,68tCO₂ por tonelada de aço e de 0,60tCO₂ para 0,29tCO₂ por tonelada de cimento. Se fosse estabelecido um *benchmark* brasileiro com base nesses valores, dado que o MAC da economia circular para o setor de cimento é negativo, indústrias de cimento poderiam investir em outras tecnologias, como CCS, para alcançar emissões neutras e vender créditos para o setor de aço, para o qual essas tecnologias adicionais de mitigação são mais caras.

5.5 SOBRE O CCS E AS *BEST AVAILABLE TECHNOLOGIES*

Além das estratégias propostas para o setor de aço, outras tecnologias de baixo carbono que atuam com base em eficiência energética têm sido sugeridas, como recuperação de calor e sistemas de controle acurado de processo. Uma lista de tecnologias (tanto atualmente disponíveis como emergentes), e seus custos de abatimento estimados, foi compilada pela Agência de Proteção Ambiental americana (US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2012). Embora a introdução de várias tecnologias de eficiência energética possa aprimorar o potencial de redução de CO₂, seus custos potenciais, para o caso brasileiro, são bastante elevados. Da mesma forma, tecnologias baseadas em redução direta e hidrogênio têm apresentado custos de investimento de 540 a 1.000 euros por tonelada de aço, enquanto *retrofits* se situam entre 15 a 170 euros (EUROPEAN COMMISSION, 2017). Mais uma vez, a grande capacidade ociosa em um cenário de médio ou baixo crescimento do aço desfavorece a introdução de novas usinas, sejam com EAF como com BATs.

No presente estudo, foi dado foco às estratégias de economia circular por justamente se tratarem de tecnologias maduras e amplamente aplicadas nas indústrias de aço e cimento. Reiterando, se a meta for emissão líquida zero ou mesmo negativa, o uso de CCS ainda se faz necessário, embora tais tecnologias permaneçam incipientes, custosas (sobretudo para o setor de aço), além de possuir incertezas ambientais e sociais. Impactos do CCS sobre as esferas social e ambiental foram apresentados por Ramírez et al. (2014).

Por não se tratar de uma tecnologia específica, mas de um grupo de tecnologias, o CCS apresenta custos muito variados ao longo da literatura. É fato que para alguns setores, como o de bioenergia, o CCS possa apresentar custo-efetividade relativamente baixo, com o mínimo de

US\$15/tCO₂e (KEMPER, 2015), porém o mesmo não ocorre para as indústrias de aço e cimento.

Leeson et al. (2017) encontraram custos médios de US\$28/tCO₂e para cimento e US\$55/tCO₂e para aço, ambos valores mais altos do que o cenário de economia circular proposto nesta tese. O mesmo estudo colocou que o custo total anualizado do CCS debitaria 80% na margem de lucro de cimento e 230% na margem de aço em 2016. Certamente, poderia se cogitar uma redução de custos com uma possível venda e uso de carbono capturado, porém seria necessária uma demanda em grande escala para efetivar tal mercado. Conforme o cenário proposto nesta tese, a economia circular representaria no custo de produção um adicional de R\$0,13/kg para o aço, e uma redução de R\$0,06/kg para o cimento¹⁴.

5.6 SOBRE AS LIMITAÇÕES E INCERTEZAS DA ANÁLISE COM RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Várias crises no Brasil e no mundo vieram marcando os últimos anos. Os preços de energia, ao mesmo tempo que têm grande peso nas análises de custo de redução, são, via de regra, os mais voláteis e imprevisíveis. Embora projetar os preços da energia e de matérias-primas dentro de um intervalo de confiança razoável não tenha sido foco da presente análise, o estudo tentou mostrar o leque de potenciais e custos mediante o método de Monte Carlo e da análise de sensibilidade. Além disso, as seguintes limitações e incertezas no modelo são reconhecidas.

Em relação à econometria, não foi foco da pesquisa realizar todos os testes estatísticos (como heterocedasticidade) pertinentes a análises de regressão. A projeção da produção de aço e cimento foi uma parte do modelo, cujo objetivo foi estabelecer uma base para avaliação das emissões e custos em futuros possíveis, e não a determinação de uma linha de evolução com alta precisão e baixa significância estatística.

A modelagem que prediz o mix do setor elétrico e os preços da eletricidade foi exógena ao presente modelo, pois o conjunto de recursos e tempo hábil disponíveis não seriam suficientes para modelar, robustamente, o setor elétrico em sua totalidade. Nesse aspecto, as limitações e incertezas do estudo de referência (PEREIRA et al., 2015) estão embutidas na

¹⁴ Adotando a taxa de câmbio média de 2020, R\$ 5,15/US\$.

presente pesquisa. A parte disso, os FEs do SIN e o potencial de geração de cinzas volantes foram calculados dentro do presente modelo (conforme apresentado nos itens 3.3 e 3.2.4.2, respectivamente).

A avaliação da substituição de clínquer foi feita sobre a disponibilidade e uso geral de escória e cinzas volantes, indiscriminando os requerimentos das aplicações finais quanto aos tipos de cimento. Já que diferentes aplicações possuem exigências específicas quanto aos tipos de cimento, é sugerida aos futuros estudos uma projeção detalhada dos subsetores demandantes de cimento.

A modelagem não se aprofundou na projeção do comércio exterior do aço, tanto o aço bruto como o aço embutido em produtos, mesmo que variações tenham sido incorporadas com o método de Monte Carlo. A adoção de um valor fixo de exportação líquida culminou no aumento do estoque interno proporcionalmente à crescente produção de aço ao longo dos anos, por isso, infere-se que um estudo mais detalhado do comércio exterior resultasse em um limite ainda mais restritivo para a reciclagem de aço.

Mesmo se apoiando em estimativas, quando não foi possível adquirir dados primários através de contato com as associações, o modelo apresenta incerteza sobre a atual capacidade instalada de aço por rota, bem como a capacidade instalada de clínquer, de moagem de cimento, de concreto e argamassa. Dados precisos de capacidade instalada são fundamentais para conduzir uma análise de custo acurada. Portanto, é de grande valia para futuros estudos que as associações industriais ou instituições governamentais possam gerar e manter bases de dados públicas com essas informações ao maior nível de detalhamento possível.

As estimativas dos FEs foram feitas com base no *tier 1* do IPCC e, apesar de ter sido feito um confronto do BEN com outras fontes para chegar a um valor final, recomenda-se que futuras análises possam se apoiar em dados primários de emissão na fonte de cada tecnologia (*tier 3*).

A abordagem do MAC, bem como o modelo em geral, é restrita a seu horizonte de análise, 2050, sendo que existem vários elementos de análise que continuam a gerar emissões, custos e receitas além deste horizonte, a exemplo, a vida útil das estruturas na construção civil. A tendência é que, com a redução do déficit habitacional e da demanda por produtos de aço e cimento, fatores relacionados à manutenção e reparos passem a ter maior representação no modelo. Perante a existência de cenários que já atingem o horizonte de 2100, cabe ressaltar que a questão climática global exige lidar simultaneamente com cenários em diferentes horizontes, reconhecendo o *tradeoff* entre distância no tempo e precisão dos resultados em modelos, observando a validade dos resultados para a tomada de decisão.

Não foi feita uma análise completa do ciclo de vida, incluindo o uso e disposição final de aço e cimento. Para estudos futuros, se preveem grandes possibilidades em reunir a abordagem de ACV com os demais temas da economia circular, simbiose industrial e cenários de baixo carbono, conforme trazidos nesta Tese para o contexto brasileiro. Também sugerem-se estudos sobre os impactos do carvão vegetal sobre a biodiversidade e recursos hídricos, sobre a substituição de aço e cimento por outros materiais, e sobre a elasticidade preço-demanda para aço e cimento.

Por último, o presente modelo desconsidera qualquer disruptura tecnológica até o ano de 2050 que afete significativamente o parque produtivo brasileiro, os custos ou os potenciais de redução de CO₂ dos cenários.

6 CONCLUSÕES

A presente tese apresentou cenários futuros com o potencial de redução de CO₂ por dois dos principais setores da indústria brasileira. Tais cenários foram desenvolvidos através de um modelo intersetorial fundamentado na perspectiva da economia circular e da simbiose industrial. O resultado central do estudo é o potencial de reduzir, no caso brasileiro, mais da metade das emissões projetadas até 2050 somente com estratégias de economia circular já aplicadas em larga escala no Brasil, por um MAC médio de US\$12/tCO₂. Além disto, vários desdobramentos surgiram com o desenvolvimento do modelo.

Ao nível de setor, constatou-se que o cenário BC gera custos adicionais para a indústria de aço e redução de custos para a indústria de cimento, sendo atrativo um sistema de créditos de carbono entre setores pelo fornecimento de escória da produção de aço para uso no cimento. Quanto à hipótese de máxima simbiose industrial sobre os custos e emissões, concluiu-se que o MAC médio do cenário BC se reduz com a maior utilização de escória e cinzas volantes (vide Figura 22, Figura 23 e Tabela 17). Por outro lado, o cenário de maximização da simbiose industrial não conduz aos melhores potenciais de mitigação. Essa negação de hipótese, em relação às cinzas volantes, é plenamente válida quando estendido o escopo de emissões para incluir toda a demanda elétrica nacional. Em relação à escória, essa negação só é válida se o uso da escória ácida no cimento estiver desabilitado, pois assim a penetração do carvão vegetal compete com a substituição de clínquer, e o estudo demonstrou que o carvão vegetal possui maior desempenho de mitigação. Os estudos que analisam a utilização da escória ácida no cimento ainda são recentes e em pouco número, mas é possível esperar que no futuro a escória ácida torne-se amplamente aplicada como adição no cimento, em conjunto com a penetração do carvão vegetal no setor de aço.

Ao nível de estratégia, constatou-se que a reciclagem, que é uma típica estratégia de economia circular dentro de um ciclo material fechado, tem um potencial pequeno no contexto brasileiro pela limitação do estoque interno de sucata. Já o carvão vegetal foi a estratégia de maior potencial de todo o cenário BC. Embora seja mais caro que a via de coque, o carvão vegetal é economicamente viável, segundo a taxa de atratividade assumida no estudo. As principais barreiras de implementação da estratégia são os limites técnicos para produção em escala na rota integrada e as incertezas sobre a garantia do manejo sustentável da madeira. Tanto o carvão vegetal para aço como o CDR para cimento são concebidos neste estudo como estratégias de economia circular sob a ótica do ciclo de carbono. Ao contrário do carvão vegetal,

coprocessamento apresentou o menor potencial de redução. Isso em parte se deve às estratégias de eficiência material e substituição do clínquer, que reduzem consideravelmente a demanda térmica e, por consequência, sobra uma pequena janela para o coprocessamento. Esta tese promove todas as cinco estratégias de economia circular a serem adotadas para aço e cimento, porém, sendo altamente provável a redução das cinzas do setor elétrico em um cenário BC, a reciclagem do aço e do carbono (carvão vegetal e CDR) significam opções mais factíveis para o futuro.

Ao nível de energético, observou-se o papel de destaque da eletricidade em termos de emissão de CO₂ por Escopo 2, de custos e da simbiose industrial. Para cada real de aumento no preço do MWh, o MAC médio aumenta em 22 centavos. A demanda elétrica do cenário BC está prevista a atingir 200 TWh em 2050, majoritariamente devido à expansão das rotas de carvão vegetal e, principalmente, EAF no cenário BC. Isto equivaleria a quase 10% da demanda nacional projetada no cenário “desafio da expansão” do PNE 2050 (BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020). Em termos de demanda energética total, o carvão vegetal representará mais da metade do consumo final no cenário BC (Figura 19). Mesmo que, a nível nacional, a demanda por terra para plantio de carvão vegetal esteja dentro da disponibilidade técnica total (itens 3.2.3.2 e 5.2), diferentes aspectos a nível regional devem ser observados, pois influenciam na disponibilidade de terra e nos custos para o setor de aço.

Entre as contribuições secundárias, houve a proposição metodológica do modelo BES (item 3.2.3.3). Esse modelo de avaliação pode ser replicado para qualquer análise de viabilidade em contexto semelhante, onde ocorre, por exemplo, a substituição de combustíveis ou rotas tecnológicas, desde que os substitutos e os substituídos atendam às seguintes condições: (a) o modelo só é recomendável para perfeitos substitutos; (b) a equação 3 apenas funciona se tanto o custo do substituto (no presente caso, C_{cv}) como a receita (R) forem maiores que o custo do substituído (no presente caso, C_{cc}). Também é necessário atentar que valores de BES maiores que 1 são equivalentes à 1 na prática, significa que a TIR não é comprometida com 100% de substituição de um combustível/tecnologia.

Através dos achados do presente estudo, se espera contribuir para as áreas de baixo carbono e da economia circular, com o entendimento das particularidades das indústrias siderúrgica e cimenteira no Brasil e o apontamento de caminhos tecnológicos de melhor custo-efetividade. A pesquisa propôs-se a ser uma investida na análise intersetorial em economia circular, buscando motivar a inserção de mais subsectores industriais e outros setores da

economia brasileira no futuro, em prol da formulação de políticas público-privadas voltadas à conciliação do desenvolvimento econômico e social com a mitigação das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- ANASSTASIA, T. T. et al. Life Cycle Assessment of Refuse Derived Fuel (RDF) for Municipal Solid Waste (MSW) Management: Case Study Area Around Cement Industry, Cirebon, Indonesia. In: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng, **Anais...IOP Publishing**, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697- Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ATES, S. A. Energy efficiency and CO2 mitigation potential of the Turkish iron and steel industry using the LEAP (long-range energy alternatives planning) system. **Energy**, v. 90, p. 417–428, out. 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544215009548>>. Acesso em: 22 out. 2018.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Cotações e boletins**. Disponível em: <<https://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpsq.asp?frame=1>>. Acesso em: 13 fev. 2020.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Taxa de Juros de Longo Prazo - TJLP**. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/taxa-juros-longo-prazo-tjlp>>. Acesso em: 22 ago. 2022.
- BOUBAULT, A.; MAÏZI, N. Devising mineral resource supply pathways to a low-carbon electricity generation by 2100. **Resources**, v. 8, n. 1, 1 mar. 2019.
- BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório Mercado Cativo - SAMP**. Disponível em: <<https://portalrelatorios.aneel.gov.br/mercado/cativo>>. Acesso em: 12 fev. 2022.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil. 6ª Edição**. 6. ed. Brasília: MCTI, 2022.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Fator médio - Inventários corporativos**. Disponível em: <https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativo_s.html>. Acesso em: 19 abr. 2022.
- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica DEA 02/09- Caracterização do uso da Energia no Setor Siderúrgico brasileiro**. Rio de Janeiro: EPE, 2009.
- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Cenários Econômicos para o PNE 2050**. Rio de Janeiro: EPE, 2018.
- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia - PNE 2050**. Brasília: MME/EPE, 2020.
- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Brasília: MME/EPE, 2021.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO INDÚSTRIA COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS; INSTITUTO AÇO BRASIL. **Consumo Aparente de Produtos Siderúrgicos [Arquivo Excel fornecido por email]**, 2020. .
- CADORE, D. E.; ANGULSKI DA LUZ, C.; FARIAS DE MEDEIROS, M. H. An investigation of the carbonation of alkaline activated cement made from blast furnace slag generated by charcoal. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 117–125, 30 nov. 2019.
- CAMARGO DE ARAÚJO, F.; BERTUSSI, G. L. SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL: ESTRUTURA TARIFÁRIA E REGULAÇÃO. **Planejamento e políticas públicas**, n. 51, p. 165–202, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9864/1/ppp_51_saneamento.pdf>. Acesso em: 24 dez. 2021.
- CANPOLAT, F. The role of coal combustion products in sustainable construction materials. **Indian Concrete Journal**, v. 85, n. 6, p. 26–38, jun. 2011.
- CARUS, M.; DAMMER, L. The Circular Bioeconomy - Concepts, Opportunities, and Limitations.

- Industrial Biotechnology**, v. 14, n. 2, p. 83–91, 2018.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Modernização da produção de carvão vegetal: subsídios para revisão do Plano Siderurgia**. Brasília: CGEE, 2015.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA; INSTITUTO AÇO BRASIL. **A indústria do aço no Brasil**. Brasília: CNI, 2017.
- DENIS-RYAN, A.; BATAILLE, C.; JOTZO, F. Managing carbon-intensive materials in a decarbonizing world without a global price on carbon. **Climate Policy**, v. 16, p. S110–S128, 20 jun. 2016. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14693062.2016.1176008>>. Acesso em: 29 set. 2021.
- DÖHRN, R.; KRÄTSCHELL, K. Long-term trends in steel consumption. **Mineral Economics**, v. 27, n. 1, p. 43–49, 2014.
- DOMENECH, T. et al. Mapping Industrial Symbiosis Development in Europe_ typologies of networks, characteristics, performance and contribution to the Circular Economy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 141, p. 76–98, 1 fev. 2019.
- ECOINVENT ASSOCIATION. **Ecoinvent 3.5**. Disponível em: <<https://v35.ecoquery.ecoinvent.org/Account/LogOn?ReturnUrl=%2FHome%2FIndex>>.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Case studies**. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/case-studies/new-entry>>. Acesso em: 7 maio. 2020.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Soja em números (safra 2020/21)**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 15 fev. 2022.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BEN - Séries Históricas e Matrizes. Capítulo 3 (Consumo de Energia por Setor)**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>>. Acesso em: 22 nov. 2022a.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BEN - Séries Históricas e Matrizes. Capítulo 7 (Energia e Socioeconomia)**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>>. Acesso em: 22 nov. 2022b.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, E. de P. **BEN - Séries Históricas e Matrizes. Capítulo 5 (Balanço dos centros de transformação)**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>>. Acesso em: 22 nov. 2022.
- ENERGY TRANSITION COMMISSION. **Mission Possible - Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by mid-century**. Londres: ETC, 2018.
- EUROPEAN COMMISSION. **DialoguE on Europe an Decarbonisation Strategies- Industry - Iron and Steel**. [s.l.] European Commission, 2017. Disponível em: <https://deeds.eu/wp-content/uploads/2020/05/Iron-and-Steel_web.pdf>.
- FAURÉ, E.; FINNVEDEN, G.; GUNNARSSON-ÖSTLING, U. Four low-carbon futures for a Swedish society beyond GDP growth. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117595, 1 nov. 2019.
- FELDMANN, J.; KENNEDY, K. **Toward a Tradable, Low-Carbon Product Standard for Steel: Policy Design Considerations for the United States**. Washington, DC: World Resources Institute, 2021.
- FRANSEN, T. et al. **Toward a Tradable Low-Carbon Cement Standard: Policy Design Considerations for the United States**. Washington, DC: World Resources Institute, 2021.
- FREITAS, J. M. de; VOGELAAR, R.; VOGELAAR, R. **Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Siderúrgica no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**. São Paulo: CETESB, 2018.
- GAGG, C. R. Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. **Engineering Failure Analysis**, v. 40, p. 114–140, 1 maio 2014.
- GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. **GNR Project**. Disponível em: <<https://gccassociation.org/gnr/>>. Acesso em: 14 set. 2020.
- GÓMEZ, D. R. et al. Volume 2: Energy. In: **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama: IPCC, 2006. p. 2.1-2.47.
- GUPTA, R. C. Woodchar as a sustainable reductant for ironmaking in the 21st Century. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 24, n. 3–4, p. 203–231, 2010. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/714856822>>. Acesso em: 11 ago. 2021.
- HASANBEIGI, A.; JIANG, Z.; PRICE, L. Retrospective and prospective analysis of the trends of

- energy use in Chinese iron and steel industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 74, p. 105–118, 1 jul. 2014.
- HERBST, A.; FLEITER, T.; REHFELDT, M. Scenario analysis of a low-carbon transition of the EU industry by 2050: Extending the scope of mitigation options. In: Eceee Industrial Summer Study Proceedings, **Anais...**2018.
- HITES, B. E. **The growth of EAF steelmaking - Recycling Today**. Disponível em: <<https://www.recyclingtoday.com/article/the-growth-of-eaf-steelmaking/>>. Acesso em: 31 jul. 2020.
- INDEXMUNDI. **Minério de ferro Preço Mensal**. Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/pt/preços-de-mercado/?mercadoria=minério-de-ferro&meses=60>>. Acesso em: 10 abr. 2020.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico 2020**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2020a.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatística de desempenho**. Disponível em: <<https://institutoacobrasil.net.br/site/estatistica-de-desempenho/>>. Acesso em: 13 fev. 2020b.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Mercado Brasileiro do Aço. Análise setorial e regional**. Rio de Janeiro: IABr, 2020c.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Publicações - Anuário Estatístico**. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/publicacoes/>>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Projeções 2018 população idade simples 2010-2060_2020-12-09 [arquivo excel]**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 13 fev. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da População**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 13 fev. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura - PEVS. Tabela 291: Quantidade produzida e valor da produção na silvicultura, por tipo de produto da silvicultura**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/291#resultado>; para extração: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/289%23resultado>>. Acesso em: 2 set. 2021a.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Índice de Preços ao Produtor - IPP**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ipp/tabelas>>. Acesso em: 28 dez. 2021b.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9270-sistema-nacional-de-pesquisa-de-custos-e-indices-da-construcao-civil.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 28 dez. 2021c.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Tabela 7752 - Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais, segundo as classes de atividades e os produtos - Prodlists Indústria 2016 e 2019**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5806>>. Acesso em: 28 dez. 2021.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. In: **Global Warming of 1.5°C**. Geneva: World Meteorological Organization, 2018. p. 33.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Report Extract - Global energy and CO2 emissions in 2020**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/global-energy-and-co2-emissions-in-2020>>. Acesso em: 4 out. 2021.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2021**. Paris: IEA, 2021.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions up to 2050**. Paris e Geneva: OECD/IEA e WBCSD, 2009.
- INTERNATIONAL INSTITUTE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Sustainable Development**. Disponível em: <<https://www.iisd.org/topic/sustainable-development>>. Acesso em: 1 out. 2019.
- ISLAS-SAMPERIO, J. M.; BIRLAIN-ESCALANTE, M. O.; GRANDE-ACOSTA, G. K. Toward a Low-Carbon Industrial Sector in Mexico. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and**

- Policy**, v. 15, n. 10–12, p. 545–571, 2020. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15567249.2020.1753855>>. Acesso em: 29 set. 2021.
- JOHN, V. M. et al. Fillers in cementitious materials — Experience, recent advances and future potential. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 65–78, 1 dez. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.013>>. Acesso em: 7 dez. 2020.
- KALMYKOVA, Y.; SADAGOPAN, M.; ROSADO, L. Circular economy - From review of theories and practices to development of implementation tools. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 190–201, 1 ago. 2018.
- KARALI, N.; SHAH, N. Bolstering supplies of critical raw materials for low-carbon technologies through circular economy strategies. **Energy Research & Social Science**, v. 88, p. 102534, 1 jun. 2022.
- KARLSSON, I. et al. Roadmap for decarbonization of the building and construction industry—A supply chain analysis including primary production of steel and cement. **Energies**, v. 13, n. 6, p. 4136, 1 ago. 2020. Disponível em: <<http://fossilfritt-sverige.se/in->>. Acesso em: 11 dez. 2020.
- KARLSSON, I.; ROOTZÉN, J.; JOHNSON, F. Reaching net-zero carbon emissions in construction supply chains – Analysis of a Swedish road construction project. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, p. 109651, 1 mar. 2020.
- KEMPER, J. Biomass and carbon dioxide capture and storage: A review. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 40, p. 401–430, 1 set. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583615002650?via%3Dihub>>. Acesso em: 11 out. 2018.
- KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221–232, 1 dez. 2017.
- LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polímeros**, v. 18, n. 2, p. 106–118, abr. 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/j/po/a/dWYSXrRkZRbPjmSx9kRWgbm/?lang=pt>>. Acesso em: 17 dez. 2021.
- LEESON, D. et al. A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other high purity sources. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 61, p. 71–84, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.03.020>>.
- LI, Z. et al. Assessment of the carbon emissions reduction potential of China's iron and steel industry based on a simulation analysis. **Energy**, v. 183, p. 279–290, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.099>>.
- LIEDER, M.; RASHID, A. Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 36–51, 1 mar. 2016.
- MALDONADO, P. et al. Mineral Industry Emissions. In: **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 3 Industrial Processes and Product Use**. Hayama: IPCC, 2006. p. 40.
- MASSON-DELMOTTE, V. et al. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge (UK): Cambridge University Press, 2021. p. 41.
- MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. **Cradle to Cradle : Remaking the Way We Make Things**. New York: North Point Press, 2002.
- MCKENNEY, D. W. et al. Cost estimates for carbon sequestration from fast growing poplar plantations in Canada. **Forest Policy and Economics**, v. 6, n. 3–4, p. 345–358, 1 jun. 2004.
- MILANEZ, B. et al. **Caderno de Diagnóstico- Resíduos Sólidos Urbanos**. São Paulo: IPEA, 2011. Disponível em: <https://sinir.gov.br/images/cadernos_de_diagnostico/01_CADDIAG_Res_Sol_Urbanos.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2022.
- MILLER, S. A. et al. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 115–124, 1 dez. 2018.
- MIRANDA, M. M. **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no**

- Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida.** 2012. Universidade de São Paulo, 2012.
- MONTEIRO, L. P. C.; MAINIER, F. B. Queima De Pneus Inservíveis Em Fornos De Clíntquer. **Engevista**, v. 10, n. 1, p. 52–58, 2010.
- MONZONI, M. **Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa.** São Paulo: FGV, 2008.
- MORFELDT, J.; NIJS, W.; SILVEIRA, S. The impact of climate targets on future steel production - An analysis based on a global energy system model. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 469–482, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.045>>.
- NAZMUL ISLAM, K. M. et al. Opportunities for inclusive and efficient low carbon food system development in Bangladesh. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, p. 128586, 15 out. 2021.
- NEO, E. R. K. et al. Life cycle assessment of plastic waste end-of-life for India and Indonesia. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 174, 1 nov. 2021.
- NORDHAUS, W. D. et al. Revisiting the social cost of carbon. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 114, n. 7, 2017.
- NORGATE, T.; LANGBERG, D. Environmental and Economic Aspects of Charcoal Use in Steelmaking. **ISIJ International**, v. 49, n. 4, p. 587–595, 2009.
- NREL. **Upload Data - OpenEI Datasets.** Disponível em: <<https://openei.org/apps/LCA/>>. Acesso em: 19 mar. 2020.
- NUMAZAWA, C. T. D. et al. Logging residues and CO₂ of Brazilian Amazon timber: Two case studies of forest harvesting. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 280–285, 1 jul. 2017.
- PACCA, S. A. et al. **Estudo de Baixo Carbono para a Indústria do Estado de São Paulo de 2014 a 2030 Relatório Síntese.** São Paulo: CETESB, 2018.
- PAULIUK, S. et al. Regional distribution and losses of end-of-life steel throughout multiple product life cycles—Insights from the global multiregional MaTrace model. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 116, p. 84–93, 1 jan. 2017.
- PAULIUK, S. et al. Global scenarios of resource and emission savings from material efficiency in residential buildings and cars. **Nature Communications** 2021 12:1, v. 12, n. 1, p. 1–10, 24 ago. 2021. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41467-021-25300-4>>. Acesso em: 1 out. 2021.
- PAULIUK, S.; WANG, T.; MÜLLER, D. B. Moving Toward the Circular Economy: The Role of Stocks in the Chinese Steel Cycle. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 1, p. 148–154, 3 jan. 2012. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es201904c>>. Acesso em: 12 maio. 2020.
- PAULIUK, S.; WANG, T.; MÜLLER, D. B. Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. Supplementary Information. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 71, p. 22–30, 2013.
- PAYET, J. Assessment of carbon footprint for the textile sector in France. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 5, p. 1–23, 1 mar. 2021.
- PERÁ, T. G.; COSTA, E. L.; CAIXETA-FILHO, J. V. Impactos dos reajustes dos preços do óleo diesel na logística do agronegócio brasileiro no período de janeiro/2017 a maio/2018. In: **Série: Logística do Agronegócio – Desafios e Oportunidades.** Piracicaba: ESALQ, 2018. 2p. 64–75.
- PEREIRA, O. L. S. et al. **Cenários para a matriz elétrica 2050: aportes ao debate energético nacional e ao planejamento participativo de longo prazo.** [s.l.] Plataforma Cenários Energéticos, 2015. Disponível em: <<http://viex-americas.com/cortex/wwf/pce/wp-content/uploads/2015/03/PCE-vertical-interactivo.pdf>>.
- PIKETTY, M. G. et al. Assessing land availability to produce biomass for energy: The case of Brazilian charcoal for steel making. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 2, p. 180–190, 2009.
- PINTO, R. G. D.; SZKLO, A. S.; RATHMANN, R. CO₂ emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector—From structural to intensity effects. **Energy Policy**, v. 114, n. December 2017, p. 380–393, 2018.
- PINZÓN, F. M. et al. **Análise da Eficiência Energética em Segimentos Industriais Selecionados - Segmento Cadeia Siderúrgica.** Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-314/topico-407/Produto_5_-_Relatorio_da_cadeia_siderurgica.pdf>.

- PUNHAGUI, K. R. G. et al. **Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**. São Paulo: CETESB, 2018.
- RAMÍREZ, A. et al. Sustainability Assessment of the Large Implementation of Carbon Capture and Storage in OECD Europe. **Energy Procedia**, v. 63, p. 7421–7428, 2014. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 26 out. 2018.
- REIS, D. C. et al. Potential CO₂ reduction and uptake due to industrialization and efficient cement use in Brazil by 2050. **Journal of Industrial Ecology**, v. 25, n. 2, p. 344–358, 1 abr. 2021. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.13130>>. Acesso em: 9 ago. 2021.
- REIS, D. da C.; MACK-VERGARA, Y.; JOHN, V. M. Material flow analysis and material use efficiency of Brazil's mortar and concrete supply chain. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 6, p. 1396–1409, 1 dez. 2019.
- ROCHA, A. C. da C. et al. Economical and Technological Aspects of Copper Removal from Water Using a Geopolymer and Natural Zeolite. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 231, n. 7, 1 jul. 2020.
- RODRIGUES, T.; BRAGHINI JUNIOR, A. Technological prospecting in the production of charcoal: A patent study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, p. 170–183, 1 set. 2019.
- ROOTZÉN, J.; JOHNSON, F. Exploring the limits for CO₂ emission abatement in the EU power and industry sectors—Awaiting a breakthrough. **Energy Policy**, v. 59, p. 443–458, 1 ago. 2013.
- SANTOS JUNIOR, A. dos. **Possibilidades e impactos da ampliação da siderurgia a carvão vegetal oriundo de florestas plantadas no Brasil**. 2011. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Sindicato Nacional da Indústria de Cimento. Relatório Anual 2013**. Rio de Janeiro: SNIC, 2013.
- SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Roadmap Tecnológico do Cimento**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.
- SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual 2020**. Rio de Janeiro: SNIC, 2020.
- SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Números da Indústria**. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-industria.php>>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- SINDIFER. **Produção de ferro-gusa em Minas Gerais e no Brasil- Anuário estatístico Ano base: 2019**. Minas Gerais: Sindifer, 2020.
- SONTER, L. J. et al. Carbon emissions due to deforestation for the production of charcoal used in Brazil's steel industry. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 4, p. 359–363, 2015.
- SOUZA, J. F. T. de. **Cenários de baixo carbono para o setor energético do Estado de São Paulo**. 2018. São Paulo, 2018.
- SOUZA, J. F. T. de et al. Industrial low carbon futures: A regional marginal abatement cost curve for Sao Paulo, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, p. 680–686, 1 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618321942?via%3Dihub>>. Acesso em: 20 set. 2018.
- SOUZA, J. F. T. de; PACCA, S. Carbon Reduction Potential and its Related Land Requirement: Analysis on Energy Transition Pathways for the Brazilian Steelmaking. In: AGU 2021 Fall Meeting, New Orleans. **Anais...** New Orleans: Earth and Space Science Open Archive, 2021a. Disponível em: <<http://www.essoar.org/doi/10.1002/essoar.10509580.1>>. Acesso em: 17 jun. 2022.
- SOUZA, J. F. T. de; PACCA, S. A. Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 169, p. 105517, 1 jun. 2021b.
- SUOPAJÄRVI, H. et al. Extensive review of the opportunities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 709–734, 2017a.
- SUOPAJÄRVI, H. et al. Effect of Charcoal and Kraft-Lignin Addition on Coke Compression Strength and Reactivity. **Energies**, v. 10, n. 11, p. 1850, 13 nov. 2017b. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/10/11/1850/htm>>. Acesso em: 11 ago. 2021.
- TOLLEFSON, J. COVID curbed carbon emissions in 2020 - but not by much. **Nature**, v. 589, n. 7842, p. 343, 1 jan. 2021.
- UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Project Design Document form (CDM PDD)- Version 03: Partial Fuel Switching to Agricultural Wastes, Sewage Sludge & Refuse Derived Fuel (RDF) at Helwan cement plant**. Helwan: UNFCCC,

2012. Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/RWTUV1356213482.7/view>>. Acesso em: 17 dez. 2021.
- UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Project Design Document Form (CDM PDD)- Project 7577 : Use of Charcoal from Renewable Biomass Plantations as Reducing Agent in Pig Iron Mill in Brazil**. Brasil: UNFCCC, 2016. Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1349250687.19>>.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Brazil_WoCQI_chemical_data [Arquivo Excel]**. Disponível em: <<https://eerscmap.usgs.gov/wocqi/>>. Acesso em: 21 dez. 2021.
- US ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. International Energy Module. In: **Annual Energy Outlook 2020**. Washington, DC: US EIA, 2020. p. 3.
- US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions From the Iron and Steel Industry**. Washington, DC: US EPA, 2012.
- VAN OORSCHOT, J. et al. Towards a low-carbon and circular economy: Scenarios for metal stocks and flows in the Dutch electricity system. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 178, 1 mar. 2022.
- VAN RUIJVEN, B. J. et al. Long-term model-based projections of energy use and CO₂ emissions from the global steel and cement industries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 112, p. 15–36, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.04.016>>.
- VAN VUUREN, D. P. et al. Alternative pathways to the 1.5 °C target reduce the need for negative emission technologies. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 5, p. 391–397, 13 maio 2018. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/s41558-018-0119-8>>. Acesso em: 9 jul. 2018.
- VASQUES, A. C. **Estudo da Reciclagem de metais no país**. Brasília: MME, 2009.
- WANG, B. Q. et al. The Technical Analysis of Energy Saving and Emission Reducing in China's Iron and Steel Industry Based on LEAP Mode. **Advanced Materials Research**, v. 634–638, n. 1, p. 3163–3169, 2013. Disponível em: <<https://www.scientific.net/AMR.634-638.3163>>. Acesso em: 29 set. 2021.
- WÅRELL, L. Trends and developments in long-term steel demand - The intensity-of-use hypothesis revisited. **Resources Policy**, v. 39, n. 1, p. 134–143, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.12.002>>.
- WATKISS, P. Estimating Environmental Health Costs: Monetary Valuation of Greenhouse Gases. In: DELLASALA, D. A.; GOLDSTEIN, M. I. (Ed.). **Encyclopedia of the Anthropocene**. Oxford: Elsevier, 2018. p. 257–263.
- WORLD BANK. **GDP per capita, PPP (constant 2017 international \$)**. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.PP.KD>>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- WORLD STEEL ASSOCIATION. **Life cycle inventory methodology report**. Brussels: WSA, 2017.
- WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel Statistical Yearbook 2018**. Brussels: WS, 2018.
- WORLD STEEL ASSOCIATION. **Fact Sheet: Steel and Raw materials**. Brussels: WSA, 2019. Disponível em: <<https://worldsteel.org/publications/fact-sheets/>>.
- WORLD STEEL ASSOCIATION. **About Steel**. Disponível em: <<https://worldsteel.org/about-steel/about-steel/>>. Acesso em: 13 ago. 2022.
- WORLD STEEL ASSOCIATION. **Fact sheet: Steel industry co-products**. Brussels: WSA, 2021. Disponível em: <<https://worldsteel.org/publications/fact-sheets/>>.
- WORLDWIDE FUND FOR NATURE et al. Combate à devastação ambiental e trabalho escravo na produção do ferro e do aço. **Amazônia, Cerrado e Pantanal 1º Edição**, p. 132, 2012.
- ZHANG, Q. et al. Comprehensive assessment of energy conservation and CO₂ emissions mitigation in China's iron and steel industry based on dynamic material flows. **Applied Energy**, v. 209, p. 251–265, 1 jan. 2018.

APÊNDICE A- TERMOS DE BUSCA UTILIZADOS NA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Foram realizadas 5 buscas combinando os diferentes elementos abordados nesta Tese. Os termos foram buscados no título, resumo e palavras-chave (do autor e adicionadas) dos artigos.

Número da busca	Objetivo	Termos de busca
1	Aço e cenários de baixo carbono	("steelmaking" or "steel sector" or "steel industry") and ("Low carbon" or "Carbon reduction" or "CO2 reduction" or "CO2 mitigation") and "scenario" and ("2030" or "2040" or "2050" or "2070" or "2100") not "cement"
2	Cimento e cenários de baixo carbono	("cement sector" or "cement industry") and ("Low carbon" or "Carbon reduction" or "CO2 reduction" or "CO2 mitigation") and "scenario" and ("2030" or "2040" or "2050" or "2070" or "2100") not ("steelmaking" or "steel sector" or "steel industry")
3	Aço e cimento e cenário de baixo carbono	((("steelmaking" or "steel sector" or "steel industry") and ("cement sector" or "cement industry")) or "steel and cement") and ("Low carbon" or "Carbon reduction" or "CO2 reduction" or "CO2 mitigation") and "scenario" and ("2030" or "2040" or "2050" or "2070" or "2100")
4	Cenário de baixo carbono e economia circular	("Low carbon" or "Carbon reduction" or "CO2 reduction" or "CO2 mitigation") and "scenario" and ("2030" or "2040" or "2050" or "2070" or "2100") and "circular economy"
5	Todos os termos	((("steelmaking" or "steel sector" or "steel industry") and ("cement sector" or "cement industry")) or "steel and cement") and ("Low carbon" or "Carbon reduction" or "CO2 reduction" or "CO2 mitigation") and "scenario" and ("2030" or "2040" or "2050" or "2070" or "2100") and ("circular economy" or "circularity")

Os anos nos termos de busca foram utilizados na tentativa de especificar a natureza do termo “cenário”, que deve se referir a uma projeção futura. Buscou-se utilizar dois ou mais termos, exemplo, “steelmaking or steel sector or steel industry”, para abranger várias formas pelas quais os autores poderiam expressar os conceitos.

**APÊNDICE B- DADOS PARA A REALIZAÇÃO DAS REGRESSÕES NOS
MODELOS ECONÔMICOS**

	Variáveis dependentes			Variáveis preditoras			PIB per capita (PPP 2017)		Ano (em relação a 2020)
	Cimento (kg/hab.)	Aços planos (kg/hab.)	Aços longos (kg/hab.)	Perfil etário- população brasileira			PIB (US\$)	PIB ² (milhões US\$)	
				0-14 anos	15-64 anos	+65 anos			
1990	179,5	n.d.	n.d.	35%	60%	5%	10.521	111	-10
1991	187,2	n.d.	n.d.	35%	60%	5%	10.494	110	-9
1992	160,5	n.d.	n.d.	34%	61%	5%	10.268	105	-8
1993	164,3	n.d.	n.d.	34%	62%	5%	10.570	112	-7
1994	164,5	n.d.	n.d.	33%	62%	5%	10.953	120	-6
1995	181,5	n.d.	n.d.	33%	63%	5%	11.254	127	-5
1996	218,9	n.d.	n.d.	32%	63%	5%	11.321	128	-4
1997	237,4	n.d.	n.d.	31%	64%	5%	11.524	133	-3
1998	245,1	n.d.	n.d.	31%	64%	5%	11.388	130	-2
1999	243,1	n.d.	n.d.	30%	65%	5%	11.273	127	-1
2000	237,4	55,8	38,6	30%	65%	5%	11.601	135	0
2001	231,6	57,4	41,0	29%	66%	5%	11.602	135	1
2002	225,4	55,2	40,3	29%	66%	5%	11.801	139	2
2003	200,6	56,1	35,1	28%	66%	5%	11.786	139	3
2004	202,7	62,3	40,9	28%	67%	6%	12.316	152	4
2005	214,9	56,6	36,8	27%	67%	6%	12.566	158	5
2006	229,3	65,9	40,4	27%	67%	6%	12.922	167	6
2007	251,2	73,4	46,3	26%	68%	6%	13.565	184	7
2008	276,3	69,0	53,8	26%	68%	6%	14.115	199	8
2009	271,1	57,1	40,8	25%	68%	7%	13.962	195	9
2010	305,1	85,0	55,2	25%	68%	7%	14.873	221	10
2011	327,9	77,7	56,8	24%	69%	7%	15.323	235	11
2012	349,1	77,9	58,0	24%	69%	7%	15.479	240	12
2013	350,8	80,6	59,5	23%	69%	8%	15.805	250	13
2014	355,5	72,0	55,0	23%	69%	8%	15.750	248	14
2015	320,8	58,6	46,1	22%	69%	8%	15.064	227	15
2016	280,6	51,4	38,8	22%	69%	9%	14.451	209	16
2017	261,1	56,5	37,9	22%	69%	9%	14.525	211	17
2018	256,4	61,1	40,7	21%	69%	9%	14.668	215	18
2019	259,3	58,9	41,0	21%	69%	10%	14.764	218	19
2020	288,8	58,1	43,2	21%	69%	10%	14.064	198	20

Fonte: Detalhadas no item 3.1.1.

n.d. = dados não disponíveis.

APÊNDICE C- CONFIGURAÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA A ANÁLISE DE INCERTEZA SEGUNDO MÉTODO DE MONTE CARLO

A tabela contida nesse apêndice apresenta a lista completa das variáveis de incerteza utilizadas no método de Monte Carlo.

As variáveis 12, 13, 15, 35 e 36, cuja média é um valor assumido, tiveram seus desvios padrões determinados como uma porcentagem em cima da média assumindo um grau de incerteza. As demais variáveis tiveram suas médias e desvios baseados nas séries históricas de 10 anos ou tão antigas quanto disponível.

As médias da taxa de crescimento do PIB (variáveis 1 a 3) foram calculadas através dos valores apresentados no cenário econômico inferior do PNE para 2015, 2030, 2040 e 2050 (BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018).

As variáveis concernentes ao crescimento do PIB, ao comércio exterior do aço (4 e 5) e à evolução do extrativismo na produção do carvão vegetal (31) foram randomizadas a cada ano de 2020 a 2050. Em outras palavras, nesses casos não se trata de um único valor aleatório para todo o período.

No caso da importação do aço (4), o valor não pode exceder a demanda total de aço no determinado ano dentro da mesma simulação.

No caso da utilização externa de sucata de aço no cenário BAU (6), o valor não pode exceder o total do estoque de sucata avaliado pelo SAAM na mesma simulação.

Semelhantemente, o fator de equivalência do coque de carvão (21) em relação ao Brent não pode ultrapassar o fator de equivalência do carvão (20) na mesma simulação.

Sobre a penetração do carvão vegetal no cenário BAU (14), nas simulações em que o carvão vegetal e a reciclagem competem, a prioridade foi dada à reciclagem.

As fontes dos valores contidos na tabela foram detalhadas ao longo da metodologia (Capítulo 3) da presente tese.

Grupo	Variável	Média	Desvio Padrão	Truncagem	
				Inferior	Superior
Projeção do PIB	1: PIB per capita (a.a.) (2015-2030)	0,73%	3,37%	-	-
	2: PIB per capita (a.a.) (2030-2040)	1,79%	3,37%	-	-
	3: PIB per capita (a.a.) (2040-2050)	1,60%	3,37%	-	-
Comércio exterior do aço	4: Importação (kt/ano)	2.305	1.388	0	-
	5: Exportação (kt/ano)	11.241	2.037	0	-
SAAM	6: Taxa de reciclagem externa (cenário BAU)	11%	2%	0%	100%
	7: Taxa de redução da sucata interna (a.a.)	1%	14%	0%	100%
	8: Vida-útil: Produtos	10	4	0	100
	9: Vida-útil: Transporte	13	6	0	100
	10: Vida-útil: Maquinário	20	9	0	100
	11: Vida-útil: Construção Civil	50	27	0	100
	12: Melhoria na taxa de recuperação (a.a.)	5%	1%	0%	100%
	13: Perda em estoque obsoleto	10%	2%	0%	100%
Cenário do Carvão Vegetal	14: Penetração do carvão vegetal no BAU	18%	1%	0%	100%
	15: BES: Taxa de atratividade	15%	4%	6%	50%
	16: BES: Preço de venda do aço (US\$/t)	861,08	364,23	715,63	-
Preços da energia e insumos	17: Preço do petróleo em 2050 (US\$/bep)	105	29,11	10	150
	18: Fator de equivalência- Gás natural	1,2	0,3	0,1	10
	19: Fator de equivalência- Carvão vegetal	0,5	0,1	0,1	10
	20: Fator de equivalência- Carvão	0,4	0,1	0,1	10
	21: Fator de equivalência- Coque de carvão	0,5	0,2	0,1	10
	22: Fator de equivalência- Coque de petróleo	1,0	0,3	0,1	10
	23: Fator de equivalência- Diesel	2,4	0,7	0,1	10
	24: Preço do minério de ferro (US\$/t aço)	140,3	11,57	1	-
	25: Preço da sucata (US\$/t aço)	154,75	85,81	0	-
	26: Tarifa da Água (R\$/m³)	9,49	4,04	0	20
	27: Tributo sobre o custo da eletricidade	32%	11%	0%	100%
Fatores de energia	28: Aço- Carvão mineral (GJ/t)	19,30	2,14	0	-
	29: Aço- Carvão vegetal (GJ/t)	16,02	4,91	0	-
	30: Clínquer- Energia térmica total (GJ/t)	3,54	0,03	0	-
Outras variáveis	31: Variação na taxa de carvão oriundo de extrativismo (a.a.)	-9,10%	12,60%	-	-
	32: Fator de emissão- carvão vegetal oriundo de silvicultura (tCO ₂ /t _{carvão vegetal})	0,145	0,043	0	-
	33: Elasticidade frete-diesel	0,34	0,08	0	-
	34: Fração de material fóssil no RSU	39,3%	10,3%	0%	100%
	35: Perdas no aproveitamento- Escória	10,0%	5,0%	0%	50%
	36: Perdas no aproveitamento- Cinzas Volantes	10,0%	5,0%	0%	50%

Fonte: Detalhadas ao longo da metodologia (capítulo 3) da presente Tese.