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

PAULA FERNANDA MORAIS ANDRADE RODRIGUES

Metodologia para adaptação de curvas de custo marginal de abatimento

São Paulo

2018

PAULA FERNANDA MORAIS ANDRADE RODRIGUES

Metodologia para adaptação de curvas de custo marginal de abatimento

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

Versão corrigida contendo as alterações solicitadas pela comissão julgadora em dezenove de março de 2018. A versão original encontra-se em acervo reservado na Biblioteca da EACH/USP e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP (BDTD), de acordo com a Resolução CoPGr 6018, de 13 de outubro de 2011.

Área de Concentração:

Ciência e Tecnologia Ambiental

Orientador:

Prof. Dr. Sérgio Almeida Pacca

São Paulo

2018

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.

CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO

(Universidade de São Paulo. Escola de Artes, Ciências e Humanidades. Biblioteca)
CRB-8 4936

Rodrigues, Paula Fernanda Moraes Andrade
Metodologia para adaptação de curvas de custo marginal de
abatimento / Paula Fernanda Moraes Andrade Rodrigues ; orientador,
Sérgio Almeida Pacca. – 2018
122 f. + 1 DVD

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-
Graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes, Ciências e
Humanidades, Universidade de São Paulo
Versão corrigida

1. Economia ambiental. 2. Mudança climática. 3. Efeito
estufa. 4. Curvas de Custo Marginal de Abatimento - MACCs. I.
Pacca, Sérgio Almeida, orient. II. Título

CDD 22.ed. – 577.0681

Nome: RODRIGUES, Paula Fernanda Moraes Andrade

Título: Metodologia para adaptação de curvas de custo marginal de abatimento

Dissertação apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade.

Área de Concentração:

Ciência e Tecnologia Ambiental

Aprovado em: 19/ 03/ 2018

Banca Examinadora

Prof. Dr.	Conrado Augustus de Melo	Instituição:	Universidade Federal do ABC
-----------	--------------------------	--------------	-----------------------------

Julgamento:	_____	Assinatura:	_____
-------------	-------	-------------	-------

Profa. Dra.	Virginia Parente de Barros	Instituição:	Universidade de São Paulo
-------------	----------------------------	--------------	---------------------------

Julgamento:	_____	Assinatura:	_____
-------------	-------	-------------	-------

Prof. Dr.	André Felipe Simões	Instituição:	Universidade de São Paulo
-----------	---------------------	--------------	---------------------------

Julgamento:	_____	Assinatura:	_____
-------------	-------	-------------	-------

Dedico este trabalho à minha tia, Olinda (em memória) e à minha mãe, Lúcia.

Agradecimentos

Agradeço ao meu estimado orientador, Sérgio Almeida Pacca, por toda a paciência e ensinamentos durante toda a minha jornada nesta pós-graduação.

Agradeço à minha tia Olinda, à minha mãe Lúcia e ao meu irmão Felipe, por toda a fé que depositaram em mim e por toda a força e amor que me deram, sem os quais eu jamais chegaria até aqui.

Agradeço aos meus queridos amigos Bruno, Marina, Vânia, Daniel, Rodrigo e Marcos por me darem apoio nos momentos mais difíceis e me ouvirem atentamente.

Ao Leandro, pelo carinho e por me ensinar sobre companheirismo, sobretudo nas horas mais conturbadas.

Agradeço a todos os colegas do Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade (PPGS) pela amizade construída.

Agradeço aos professores do PPGS por todo o conhecimento oferecido a mim e, também, à equipe administrativa que cuida deste Programa com tanto zelo. Um especial agradecimento ao Fabiano e à Vanessa.

Agradeço ao NUPREC/Cenbio da USP (Butantã), por permitir que eu realizasse parte das minhas pesquisas em suas instalações.

Agradeço à EACH e à USP pela criação do PPGS e por toda a infraestrutura disponibilizada a mim como aluna.

Agradeço à Deus, por tudo!

“Se você não puder se destacar pelo talento, vença pelo esforço”

(Dave Weinbaum)

RESUMO

RODRIGUES, Paula Fernanda Moraes Andrade. **Metodologia para adaptação de curvas de custo marginal de abatimento**. 2018. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Versão corrigida.

O Acordo de Paris preconiza que cada país descreva e comunique suas ações climáticas pós-2020. Neste contexto, as Curvas de Custo Marginal de Abatimento (MACC) podem ser úteis aos países e aos tomadores de decisão, pois mostram de forma clara o custo (em unidades monetárias por massa de CO₂e) para a implementação de tecnologias de mitigação de emissões de gases do efeito estufa (GEE) e o seu potencial de redução de emissões associado (em massa de CO₂e). As MACC podem ser utilizadas para qualquer unidade política, como: país, cidade ou estado. Podem, também, ser aplicadas a diversas áreas, tais como: transporte, construção, poluição do ar, agricultura ou indústria. Diante desta diversidade de estudos e aplicações, o objetivo do presente trabalho foi desenvolver uma metodologia de adaptação de MACC, de estudos publicados na literatura, para qualquer unidade política ou ano de interesse. Isto permitirá a “reutilização” destas MACC, porém sem a necessidade da realização de novos estudos. O desenvolvimento da metodologia de adaptação prescindiu de uma meta-análise e harmonização de dados da literatura. A metodologia desenvolvida foi aplicada ao Brasil, considerando os subsetores industriais de cimento e de siderurgia. Ela foi, também, implementada no *software Access®* (e denominada *re-MACC*) para que todo o processo de adaptação das MACC pudesse ser realizado automaticamente. Analisando um total de 178 tecnologias de baixo carbono para os subsetores de cimento e de siderurgia, o resultado mostrou que seria possível reduzir, em 2014, aproximadamente 52,4% das emissões de CO₂e, gerando uma economia monetária de 1.835 US\$/tCO₂e, caso o Brasil as adotasse. A metodologia foi capaz de harmonizar dados para qualquer unidade política ou ano de interesse, todavia refinamentos são necessários para torná-la ainda mais acurada.

Palavras-chave: curvas de custo marginal de abatimento, meta-análise, baixo carbono, mudanças climáticas, indústria.

ABSTRACT

RODRIGUES, Paula Fernanda Morais Andrade. **Methodology for adapting marginal abatement cost curves**. 2018. 122 p. Dissertation (Master of Science) – School of Arts, Sciences and Humanities, University of São Paulo, São Paulo, 2018. Corrected version.

The Paris Agreement calls on each country to describe and report on its climate actions post-2020. In this context, the Marginal Abatement Cost Curves (MACC) can be useful to countries and decision makers as they clearly show the cost (in monetary units per mass of CO₂e) for the implementation of greenhouse gas (GHG) emission mitigation technologies and their associated emission reduction potential (in mass of CO₂e). They can be used for any jurisdiction, such as country, city or state. They can also be applied to several areas, such as: transportation, buildings, air pollution, agriculture or manufacturing. In view of this diversity of studies and applications, the objective of the present work was to develop a methodology for adapting MACC, from studies published in the literature, to any jurisdiction or year of interest. This work allows for "re-using" these MACCs, but without the need for new studies. The development of the methodology is based on a meta-analysis and harmonization of literature data. The methodology was applied to Brazil, considering the industrial cement and steel subsectors. It was implemented in the *Access® software* (and called *re-MACC*) so the MACC adaptation process could be performed automatically. Analyzing a total of 178 low-carbon technologies for the Brazilian industrial subsectors of cement and steel, the result showed that it would be possible to reduce by approximately 52.4% of CO₂e emissions by 2014, generating monetary savings of 1,835 US\$/tCO₂e. The methodology proved to be capable in harmonizing the data, however further refinements are needed to make it even more accurate.

Keywords: marginal abatement cost curves, meta-analysis, low carbon, climate change, industry.

Lista de Figuras

Figura 1: Exemplo de uma MACC e seus componentes.	24
Figura 2: Uma MACC e sugestões de instrumentos de política climática, conforme região da curva.....	28
Figura 3: Comparação entre uma MACC baseada em especialistas (à esquerda) e uma MACC modelo-derivada (à direita).....	29
Figura 4: Menu de operação do <i>EnerFuture MACC®</i> (versão de teste). A MACC, para o país Romênia, mostra no eixo y as emissões evitadas de CO ₂ provenientes da energia, no subsetor de Minerais não-metálicos (em ktCO ₂). No eixo x estão representados os custos.	47
Figura 5: Esquema ilustrado do processo de produção do aço.....	54
Figura 6: Etapas de uma meta-análise.	58
Figura 7: Componentes de uma tabela do <i>Access®</i>	67
Figura 8: Relações criadas entre as tabelas do <i>re-MACC</i> para as harmonizações. O menu, à esquerda, indica o nome de cada tabela e consulta.....	69
Figura 9: Tabela “Tecnologia” e sua lista de atributos. A figura mostra um ícone de chave (chave-primária) e a sigla “FK” (chave-estrangeira).....	71
Figura 10: Exemplo de classificação ISIC.	73
Figura 11: Proposta de classificação do potencial de redução de emissões, de cada tecnologia em estudo, conforme sua fonte de emissão.....	75
Figura 12: Esquema para comparar as variações (Var) de tecnologias iguais entre A e B e, entre A e B harmonizado (<i>B_{har}</i>).	82
Figura 13: Comparação entre o potencial de redução de emissões das tecnologias dos artigos A e B, antes e após harmonização de B (<i>B_{har}</i>).	83
Figura 14: Comparação entre o MAC das tecnologias dos artigos A e B, antes e após a harmonização de B (<i>B_{har}</i>).	84
Figura 15: MACC para o Brasil (ano de 2014) para os subsetores de cimento [CIM] e de siderurgia [SID]. A letras entre colchetes referem-se às tecnologias do tipo C (Calor) ou E (Eletricidade).....	91

Lista de Tabelas

Tabela 1: Produção e despacho de cimento por grupo industrial para os anos de 2012 e 2013 (em 1.000 toneladas).....	50
Tabela 2: Produção de aço bruto brasileira, no período de 2011 a 2015, por grupo empresarial.....	52
Tabela 3: Parque produtor de aço no Brasil (tipo de usinas e produtos) por fabricante.	55
Tabela 4: Emissões absolutas e específicas de GEE para a produção de aço no Brasil, no período de 2011 a 2013.	56
Tabela 5: Número retornado de artigos conforme sítio de pesquisa	64
Tabela 6: Listagem de tabelas e consultas criadas e seus respectivos conteúdos.....	70
Tabela 7: Análise de sensibilidade para os potenciais de redução de CO ₂ econômicos na indústria de cimento tailandesa com diferentes taxas de desconto.....	87

Lista de abreviaturas e siglas

\$	Unidade monetária
€	Euro
ACV	Análise do Ciclo de Vida
AFOLU	<i>Agriculture, Forestry and Other Land Use</i>
CAPEX	<i>Capital expenditure</i>
CGE	<i>Computable General Equilibrium</i>
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente
CPI	<i>Consumer Price Index</i>
CQNUMC	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
EAF	<i>Electric Arc Furnace</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EPPA	<i>Emissions Prediction and Policy Analysis</i>
FE	Fator de Emissão
g/km	Gramas por quilograma
GEE	Gases do Efeito Estufa
GEF	<i>Global Environment Fund</i>
GgCO ₂	Gigrama de dióxido de carbono
GWh	Gigawatt-hora
IPC	Índice de Preço ao Consumidor
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPPU	<i>Industrial Processes and Product Use</i>
ISIC	<i>International Standard Industrial Classification of All Economic Activities</i>
kt	Quilotonelada
ktoe	Quilotonelada de óleo equivalente
kWh	Quilowatt-hora
LCS	<i>Low Carbon Society</i>
LEAP	<i>Long-range Energy Alternatives Planning system</i>
MAC	<i>Marginal Abatement Cost</i>
MACC	<i>Marginal Abatement Cost Curve</i>
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME	Ministério de Minas e Energia
MMTCO ₂ e	Milhões de toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente
Mt	Megatonelada
MtCO ₂ e	Megatonelada de dióxido de carbono equivalente
Mtep	Megatonelada equivalente de petróleo
NDC	<i>Nationally Determined Contribution</i>

OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
OPEX	<i>Operational expenditure</i>
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PJ	Petajoule
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses</i>
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SINDIFER	Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
t	Tonelada
tep	Tonelada equivalente de petróleo
TJ	Terajoule
TWh	Terawatt-hora
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
US\$	Dólar
W/m ²	Watt por metro quadrado

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	21
2.1. OBJETIVO GERAL	21
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3. REVISÃO DA LITERATURA	22
3.1 CONCEITOS SOBRE MACC	22
3.1.1. Definição de custo marginal, potencial de abatimento e MACC	22
3.1.2. Particularidades sobre as MACC	25
3.1.3. As MACC e os tipos de políticas	26
3.1.4. Os tipos de MACC	29
3.1.4.1. MACC baseadas em especialistas e modelo-derivadas	29
3.1.4.1.1. MACC baseadas em especialistas	30
3.1.4.1.2. MACC modelo-derivadas	31
3.1.4.1.2.1. Abordagens Bottom-up versus Top-down	32
3.1.4.2. MACC medidas explícitas (potencial-total ou potencial-alcançável)	35
3.1.5. Limitações e aspectos importantes sobre as MACC	36
3.1.6. Estudos MACC para indústrias (internacionais e brasileiras)	41
3.1.7. Softwares e bancos de dados de MACC	44
3.2. CONCEITOS SOBRE PRODUÇÃO INDUSTRIAL E EMISSÕES (CIMENTO E SIDERURGIA)	47
3.2.1. Produção e emissões industriais	48
3.2.1.1. Indústria Cimenteira	49
3.2.1.2. Indústria Siderúrgica	51
3.3. CONCEITOS METODOLÓGICOS	57
3.3.1. Revisão sistemática, meta-análise e harmonização	57
3.3.2. Estudos envolvendo meta-análises e harmonizações	60
4. METODOLOGIA	63
4.1. META-ANÁLISE: ETAPA 1 – DEFINIÇÃO DO OBJETIVO DA REVISÃO SISTEMÁTICA	64
4.2. META-ANÁLISE: ETAPA 2 – DESENVOLVIMENTO DO PROTOCOLO	64
4.3. META-ANÁLISE: ETAPA 3 – CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE	65
4.4. META-ANÁLISE: ETAPA 4 – PROCESSO DE EXTRAÇÃO E ARMAZENAMENTO DOS DADOS	66
4.4.1. Criando relações entre as tabelas no Access® (re-MACC)	67

4.5. META-ANÁLISE: ETAPA 5 – MÉTODOS DE ANÁLISE PLANEJADOS (HARMONIZAÇÃO)	72
4.5.1. Classificando as tecnologias coletadas	72
4.5.2. Harmonização do Potencial de Redução de Emissões	73
4.5.2.1. Harmonização do Tipo C – Calor	76
4.5.2.2. Harmonização do Tipo E – Eletricidade	77
4.5.3. Harmonização do Custo Marginal de Abatimento	79
4.5.4. Geração da MACC brasileira	80
4.6. METODOLOGIA PARA VALIDAÇÃO	81
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
5.1. METODOLOGIA PARA VALIDAÇÃO	83
5.2. MACC BRASILEIRA	90
6. CONCLUSÃO	94
REFERÊNCIAS	96
APÊNDICE 1 - Relações criadas entre tabelas no Access® (re-MACC).	111
APÊNDICE 2 - Listagem de tabelas e consultas criadas no re-MACC.....	112
APÊNDICE 3 - Tecnologias de baixo carbono harmonizadas para o Brasil, para o ano de 2014.....	113
APÊNDICE 4 - Tecnologias utilizados para geração da MACC, no caso Brasil, para o ano de 2014.....	120
APÊNDICE 5 - MACC para o Brasil, no ano de 2014 (cimento e siderurgia).	122

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), a maior parte do aumento observado nas temperaturas médias globais, desde meados do século 20, é “muito provavelmente devido ao aumento observado nas concentrações de Gases do Efeito Estufa (GEE) antropogênicas” (IPCC, 2007, p. 5).

Com o intuito de mitigar os problemas ambientais mundiais representantes de 179 países consolidaram uma agenda global durante a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992. Nesse contexto foi elaborada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC na sigla, em inglês) (MMA [a], 2018) cujo objetivo é a estabilização das concentrações de GEE na atmosfera a um nível que impeça interferências antropogênicas perigosas ao clima (KUIK *et al.*, 2009).

Vinculado à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, criou-se um acordo internacional, denominado Protocolo de Quioto, cujo objetivo é estabelecer metas de redução de emissões de GEE. Ele foi adotado em 1997, em Quioto, no Japão e entrou em vigor em 2005 (UNFCCC [a], 2018).

Ao reconhecer que os países desenvolvidos são os principais responsáveis pelos altos níveis atuais de emissões de GEE na atmosfera, como resultado de mais de 150 anos de atividade industrial, o Protocolo impõe maiores obrigações aos países desenvolvidos sob o princípio de "responsabilidades comuns, porém diferenciadas" (UNFCCC [a], 2018).

Desta forma, os países desenvolvidos (conhecidos como Anexo I) que ratificaram o tratado têm o compromisso de diminuir suas emissões de GEE, enquanto os países subdesenvolvidos (ou não Anexo I), como o Brasil, não têm metas obrigatórias, mas devem auxiliar na redução de emissão desses gases (PORTAL BRASIL, 2010).

O mais recente acordo, no cenário de mitigação de GEE, ocorreu em dezembro de 2015, em Paris, quando foi realizada a 21ª Conferência das Partes¹ (COP-21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Nela foi adotado o Acordo de Paris (MMA [b], 2018).

¹ "Parte" significa uma Parte do Acordo (MMA, 2015).

As 196 Partes reunidas concordaram com uma meta de longo prazo para aumentar a capacidade de adaptação aos impactos adversos da mudança climática e promover a resiliência climática e os baixos níveis de emissão de GEE, de forma a não ameaçar a produção de alimentos. O objetivo do Acordo é o de limitar o aquecimento a 1,5 a 2 °C acima dos níveis pré-industriais (UNFCCC [b], 2018).

Um importante conceito neste Acordo são as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs). Os NDCs incorporam esforços de cada país para reduzir as emissões nacionais e se adaptar aos impactos das mudanças climáticas. Ele exige que cada Parte prepare, comunique e mantenha sucessivas contribuições, determinadas no âmbito nacional, as quais pretenderá alcançar. Assim, cada plano climático denota a ambição do país na redução de suas emissões de GEE, levando em consideração suas circunstâncias e capacidades nacionais (UNFCCC [b], 2018).

As Partes acordaram que cada país deveria elaborar e apresentar, antes da COP-21, sua “pretendida contribuição nacionalmente determinada” (iNDC, na sigla em inglês) (MMA [b], 2018).

Sendo assim, o Brasil apresentou sua iNDC² comprometendo-se a reduzir suas emissões de GEE em 37% (abaixo dos níveis de emissão de 2005), em 2025 e indicou uma meta de redução subsequente de 43% (abaixo dos níveis de emissão de 2005), em 2030 (MMA, 2015).

Como medidas para atingir seus objetivos o Brasil, no setor da energia, pretende “alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030” (MMA, 2015, p. 3). Já no setor industrial suas metas são de “promover novos padrões de tecnologias limpas e ampliar medidas de eficiência energética e de infraestrutura de baixo carbono” (MMA, 2015, p. 4).

Neste contexto, as curvas de custo marginal de abatimento (MACC, na sigla em inglês ou, simplesmente “curvas MAC”) podem ser úteis aos países na quantificação de seu potencial de redução de emissões e no investimento necessário para tanto de modo a buscar um futuro com menos emissões de GEE.

² “Todas as políticas, medidas e ações para implementar a iNDC do Brasil são conduzidas no âmbito da Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei 12.187/2009), da Lei de Proteção das Florestas Nativas (Lei 12.651/2012, o chamado Código Florestal), da Lei do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (Lei 9.985/2000) e da legislação, instrumentos e processos de planejamento a elas relacionados” (MMA, 2015, p. 1).

Uma MACC é definida como um gráfico que indica o custo marginal (o custo da próxima unidade) de redução de emissões para quantidades variáveis de redução de emissões (EKINS; KESICKI; SMITH, 2011). Sua força reside na apresentação do potencial de redução e os custos médios relacionados de maneira compreensível para os tomadores de decisão (KESICKI e STRACHAN, 2011).

A apresentação gráfica dos custos e do potencial de redução de emissões das medidas em uma MACC possibilita determinar quais delas são as mais efetivas para que uma meta de redução de emissões seja atingida ou, segundo Szklo, Schaeffer e de Gouvello (2010, p. 26) “refere-se a uma representação gráfica da atratividade econômica relativa de opções de mitigação de GEE em relação ao potencial de mitigação de GEE destas opções”.

As MACC são um método para aumentar a transparência sobre a disponibilidade e os efeitos das tecnologias para as pessoas e para o meio ambiente (BEAUMONT e TINC, 2004). Esta consciência deve incentivar os indivíduos a fazerem uso das alternativas menos poluentes (WÄCHTER, 2013).

Nos últimos anos, as MACC tornaram-se uma ferramenta padrão para analisar os impactos do Protocolo de Quioto e do comércio de emissões (KLEPPER; PETERSON, 2006). Uma vez que essas curvas estão disponíveis para as diferentes regiões do mundo, é possível determinar o valor de quotas de emissão, o custo total da redução de emissões regionais para diferentes cenários de mercados internacionais de créditos de carbono (KLEPPER; PETERSON, 2006).

Vários estudos têm sido publicados aplicando as MACC para diferentes unidades políticas³ ao redor do mundo: no âmbito global, comparando diversos países (AKIMOTO *et al.*, 2012); no regional, para apenas um país (KO *et al.*, 2013) ou combinando dois países, como Índia e Brasil (TATRALLYAY; STADELMANN, 2013); para uma cidade, como Toronto (IBRAHIM e KENNEDY, 2016); um estado, como a Califórnia (SWEENEY *et al.*, 2008) ou mesmo, para uma (HASANBEIGI, 2010 [a]) ou mais províncias chinesas (ZHOU *et al.*, 2013).

Há estudos envolvendo MACC para diversos países, como Brasil (DE GOUVELLO, 2010), Holanda (BLOK *et al.*, 1993), Irlanda (KENNEDY, 2010). Há, também, estudos para a União Europeia (BLOK *et al.*, 2001) e para o Reino Unido, sendo utilizados na

³ O termo “unidade política”, no contexto deste estudo, pode referir-se, por exemplo, à uma cidade, a um estado, a um país ou à uma província (termo usado em alguns países).

definição de suas políticas de mudanças climáticas (vide H. M. GOVERNMENT, 2009 e PYE *et al.*, 2008).

As MACC podem ser empregadas para uma diversidade de finalidades, como: setor de construção (DE MELO e JANNUZZI, 2015), carros de passageiros (FAN *et al.*, 2017) ou transporte marítimo (HEITMANN e PETERSON, 2014), poluição do ar (JIA *et al.*, 2016), ovinocultura (JONES *et al.*, 2015) e bovinocultura (DE OLIVEIRA SILVA *et al.*, 2015), agricultura (NAYAK *et al.*, 2015), resíduos (DEDINEC *et al.*, 2015), setor industrial (SELVAKKUMARAN *et al.*, 2014), indústrias cimenteira (HASANBEIGI *et al.*, 2010 [a]) ou siderúrgica (WANG *et al.*, 2007).

Portanto, na literatura, existe uma quantidade grande de estudos envolvendo MACC contendo, cada um, diversas tecnologias de baixo carbono com seus variados potenciais de redução de emissões e custos/investimentos de implementação destas medidas.

Diante desta diversidade de estudos e aplicações, o objetivo do presente trabalho foi desenvolver uma metodologia de adaptação de MACC (do tipo baseadas em especialistas⁴) de estudos da literatura, para qualquer unidade política ou ano de interesse.

Para auxiliar no desenvolvimento desta metodologia, foi realizada uma meta-análise⁵ e harmonização⁶ de dados da literatura de estudos envolvendo MACC. Para delimitar o universo de dados, optou-se pela busca de estudos relacionados às produções industriais de cimento e de aço e ferro ou, mais especificamente, aos subsetores⁷ de “Produtos Minerais” e “Indústria Metalúrgica”, ambos pertencentes ao setor de “Processos

⁴ O termo "curva MAC" (ou MACC) refere-se na literatura a várias curvas, construídas de várias maneiras (VOGT-SCHILB; HALLEGATTE, 2014). Kesicki (2010) propõe classificar as MACC em curvas baseadas em especialistas e modelo derivadas. As MACC baseadas em especialistas (ou curvas de custos tecnológicos), baseiam-se em hipóteses desenvolvidas por peritos para o cálculo das emissões do cenário de referência, do potencial de redução das emissões e do custo de cada medida de mitigação (classificadas em ordem crescente de custo) (KESICKI, 2010). Para mais detalhes, vide seção 3.1.4.1.1, do presente estudo.

⁵ Segundo Cook, Sackett e Spitzer (1995) “meta-análise equivale à visão global quantitativa”. Ela é a revisão sistemática que utiliza métodos estatísticos para combinar e resumir os resultados de vários estudos de um mesmo assunto (COOK, SACKETT, SPITZER; 1995).

⁶ Harmonização refere-se a todos os esforços que padronizam as entradas e saídas de pesquisas comparativas (GRANDA; BLASCZYK, 2010).

⁷ A denominação para os setores e subsetores escolhidos segue aquela utilizada no “II Inventário Nacional” (MCT, 2010). No Inventário, pertence ao setor de “Processos Industriais” os subsetores (entre outros) de “Produtos Minerais” (que inclui, entre outros, a produção de cimento e de cal) e “Indústria Metalúrgica” (que inclui, entre outros, a produção de ferro e aço, de ferroligas e de alumínio). No “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories” (IPCC, 2006) estes mesmos subsetores pertencem ao setor de “Processos Industriais e Uso de Produtos” (IPPU) cujas categorias são “Indústria Mineral” (2A), subcategoria de “Produção de Cimento” (2A1) e; “Indústria de Metal” (2C), cuja subcategoria é “Produção de Ferro e Aço” (2C1).

Industriais”. Para simplificar, eles serão mencionados no estudo, simplificadaamente, como subsetores de cimento e de siderurgia.

O país escolhido para se aplicar a metodologia desenvolvida foi o Brasil, no ano de 2014.

Buscou-se desenvolver procedimentos para validar a metodologia, pela comparação com estudos dos autores Worrell *et al.* (2000) e Hasanbeigi *et al.* (2010 [b]).

Os dados da literatura a serem harmonizados foram o potencial de redução de emissões de GEE (MtCO₂e)⁸ e os custos marginais de abatimento (US\$/tCO₂e)⁹. Ambas as variáveis são os elementos-chave necessários à construção das MACC.

A harmonização dos dados da literatura foi necessária devido ao potencial de redução de emissões de cada tecnologia variar, entre outros, conforme o Fator de Emissão de CO₂ que, por sua vez, está relacionado ao país e ao ano considerados. Já os custos marginais de abatimento variam conforme o ano considerado, a inflação no período, entre outros.

A metodologia aqui desenvolvida foi também implementada no *software Access*®¹⁰ para que todo o processo de adaptação das MACC pudesse ser realizado automaticamente. A essa ferramenta deu-se o nome de *re-MACC*.

Deve-se ressaltar que, apesar da metodologia ser aplicada ao Brasil, é possível a qualquer país ou unidade política utilizar a metodologia aqui proposta para a construção de suas MACC. É possível utilizá-la, também, para qualquer ano de interesse.

Todas as informações-base utilizadas na criação da metodologia para a adaptação das MACC são rastreáveis e publicadas periodicamente em bases de dados de órgãos governamentais, o que é uma garantia de que tal metodologia não fique defasada ou seja desqualificada. Adicionalmente, a metodologia desenvolvida foi detalhada para que pudesse ser replicada.

O *re-MACC*, junto aos dados coletados, os cálculos e os resultados da harmonização, será disponibilizado em conjunto com a dissertação na Biblioteca de Teses e Dissertações¹¹ da Universidade de São Paulo, podendo ser utilizado ou modificado, conforme necessidade do usuário. Todas as tecnologias de baixo carbono aqui mencionadas possuem códigos que podem ser rastreados no *re-MACC*.

⁸ MtCO₂e é a unidade de Megatonelada de dióxido de carbono equivalente.

⁹ CO₂e é a unidade de dióxido de carbono equivalente, sendo uma medida usada para se equiparar emissões de vários GEE com base em seu potencial de aquecimento global (OECD, 2013).

¹⁰ O *Microsoft® Office Access®* é marca registrada da *Microsoft®*.

¹¹ Disponível em <www.teses.usp.br> Acesso em: 20 de janeiro, 2018.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma metodologia de adaptação de MACC, a partir de dados secundários, para qualquer unidade política ou ano de interesse.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar uma metodologia para a seleção e coleta de dados secundários de estudos envolvendo MACC;
- Desenvolver uma metodologia para a adaptação destes dados, utilizando procedimentos de meta-análise e harmonização (retrospectiva);
- Organizar os dados coletados e otimizar os cálculos desenvolvidos em um *software* de banco de dados;
- Aplicar a metodologia desenvolvida para gerar uma MACC adaptada para os subsetores de cimento e siderurgia brasileiros;
- Elaborar procedimentos para validar a metodologia desenvolvida.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo foi realizada uma revisão da literatura, sendo o texto dividido em três assuntos principais: conceitos sobre as MACC (Seção 3.1), conceitos sobre produção industrial e emissões (cimento e siderurgia) (Seção 3.2) e conceitos metodológicos (Seção 3.3).

O intuito da primeira seção (3.1) - específico sobre as MACCs - é evidenciar suas particularidades bem como suas implicações políticas.

A segunda seção (3.2) engloba uma contextualização sobre os processos industriais relacionados à produção de cimento, ferro e aço e suas emissões correlatas. O intuito desta seção é contextualizar as especificidades de cada subsetor presente no estudo.

A terceira seção (3.3) traz a definição de conceitos metodológicos aplicados ao presente trabalho e alguns estudos existentes envolvendo meta-análises e harmonizações. O intuito desta seção é esclarecer conceitos importantes utilizados na metodologia aqui desenvolvida.

3.1 CONCEITOS SOBRE MACC

Esta seção traz conceitos importantes sobre as MACC, sendo subdividida em: definições de termos-chave (Seção 3.1.1), suas particularidades (Seções 3.1.2), tipos de políticas (Seção 3.1.3), tipos de MACC (Seção 3.1.4), suas limitações (Seção 3.1.5), alguns estudos nacionais e internacionais envolvendo o tema (Seção 3.1.6) e *softwares* e bancos de dados existentes (Seção 3.1.7).

3.1.1. Definição de custo marginal, potencial de abatimento e MACC

Duas variáveis são de suma importância para o estudo em questão, sendo elas o custo marginal de abatimento de emissões (MAC, na sigla em inglês) e o potencial de redução (ou abatimento) de emissões. Tendo estas duas variáveis pode-se obter a “Curva” MAC ou MACC.

O MAC é representado em unidade monetária por massa de CO₂ equivalente (\$/tCO₂e), sendo o resultado de uma comparação entre o cenário de Baixo Carbono (BC) e o Cenário de Referência para reduzir uma tonelada de CO₂e (GOUVELLO, 2010).

Quando se menciona cenário de referência (ou linha de base), este pode ser entendido como sendo o cenário de operação industrial ao longo de um período (definido) de tempo. Este cenário engloba as tecnologias em uso (ou as que serão usadas no período) e aquelas tecnologias que o setor pretende adotar (no mesmo período considerado). O Cenário de Baixo Carbono, por sua vez, corresponde àquele que engloba as tecnologias de baixo carbono a serem adotadas e que devem emitir menos CO₂e, comparadas àquelas do Cenário de Referência, no período definido (KESICKI, 2010).

Assim, o MAC é resultante da diferença entre o cenário de Baixo Carbono e o Cenário de Referência. A diferença é calculada entre os custos e entre as emissões, conforme Equação 1.

$$MAC = \frac{\sum_i^t (CA^{Baixo\ Carbono} - CA^{Referência})}{\sum_i^t (EA^{Referência} - EA^{Baixo\ Carbono})}$$

Fonte: Gouvello (2010).

(Eq. 1)

Onde:

MAC: Custo marginal de abatimento;

CA^{Baixo Carbono}: Custo anual da tecnologia no Cenário de Baixo Carbono;

CA^{Referência}: Custo anual da tecnologia utilizada no Cenário de Referência;

EA^{Baixo Carbono}: Emissões anuais de GEE com a tecnologia utilizada no Cenário de Baixo Carbono;

EA^{Referência}: Emissões anuais de GEE com a tecnologia utilizada no Cenário de Referência.

O potencial de abatimento de emissões, por sua vez, corresponde à quantidade (em massa de CO₂e) não emitida, caso seja implementada uma ou mais tecnologias de BC no período considerado. Este potencial é representado no eixo horizontal da MACC.

Na Figura 1 tem-se a representação de uma MACC. No eixo das abscissas tem-se o potencial anual de abatimento das emissões (tCO₂e/ano) e no eixo das ordenadas, o custo marginal de abatimento (R\$/tCO₂e). As colunas representam diferentes tecnologias de baixo carbono (numeradas de 1 a 5).

Figura 1: Exemplo de uma MACC e seus componentes.
Fonte: Adaptado de ICF (2014).

Algumas medidas de baixo carbono podem ser implementadas a um custo unitário mais baixo do que outras, enquanto algumas são pensadas como sendo econômicas, ou seja, poderiam simultaneamente economizar recursos econômicos e também reduzir as emissões (MORAN *et al.*, 2010). Tais medidas descrevem uma situação “ganho-ganho” na qual os custos resultantes têm um sinal negativo. Um exemplo que ilustra a situação pode ser a implementação de uma tecnologia de eficiência energética, como troca de lâmpas incandescentes por fluorescentes. Se a soma dos custos de energia e os custos descontados de investimento são inferiores aos custos da energia da tecnologia antiga, isto quer dizer que a nova tecnologia leva a uma redução das emissões e a um resultado econômico favorável. Entretanto, um valor positivo nos custos de uma medida significa que os resultados descontados ao longo da vida do investimento serão superiores aos resultados da medida do cenário de referência (WÄCHTER, 2013).

As MACC representam mais precisamente o volume de custos (incluindo custos negativos) e, embora algumas medidas sejam consideradas de alto custo, com o passar do tempo, após serem implantadas, pode ser que sejam mais rentáveis do que aquelas

consideradas “baratas” (BEAUMONT e TINCH, 2004). A relação entre o CAPEX¹² e o OPEX¹³ das tecnologias pode levar a resultados mais econômicos. As MACC destacam este efeito, que de outra forma poderia ser ignorado (WÄCHTER, 2013). Os cálculos a ela subjacentes fornecem uma imagem clara das opções de abatimento, sendo possível realizar um cálculo direto, estando todos os dados disponíveis (ELLERMAN e DECAUX, 1998).

3.1.2. Particularidades sobre as MACC

As primeiras MACC foram desenvolvidas no final da Década de 1970 com o intuito de buscar estratégias para a redução do consumo de petróleo após os dois choques envolvendo o preço deste recurso energético (FARUQUI *et al.*, 1990; KESICKI, 2010). Posteriormente, Meier (1982) desenvolveu curvas de conservação de energia, sendo chamadas, na época, de “curvas de oferta de energia conservada”.

A partir do início da Década de 1990, o conceito de curvas de abatimento de carbono foi aplicado para ilustrar o custo associado à redução de carbono (KESICKI, 2010). Vide os trabalhos de Jackson (1991); Mills *et al.* (1991) e Sitnicki *et al.* (1991).

Uma importante questão para a formulação de políticas climáticas refere-se a avaliar qual é o potencial de redução de emissões de GEE, e em quais setores e a que custos é possível obtê-lo (HOOGWIJK *et al.*, 2010).

As MACC constituem um ferramental comprovado para destacar que reduzir grandes quantidades de emissões a um baixo custo é tecnicamente possível, sendo que muitas tecnologias de baixo carbono, podem se pagar por si mesmas graças, por exemplo, a ganhos de eficiência energética (KESICKI e EKINS, 2012). Elas também podem ser vistas como um método para descrever uma relação custo-benefício no qual o custo da redução corresponde aos "custos" e a quantidade de CO₂e evitada corresponde ao "benefício". Elas representam a primeira tonelada que pode ser reduzida ao menor custo até a tonelada mais cara (WÄCHTER, 2013).

¹² Capital expenditure.

¹³ Operational expenditure.

Um custo muito alto pode inviabilizar a implantação de uma tecnologia, assim como a quantidade de redução de emissões pode ser insignificante, a ponto de sua contribuição para as questões referentes às mudanças climáticas ser irrisória (WÄCHTER, 2013).

Neste contexto, as MACC têm sido frequentemente utilizadas para ilustrar a viabilidade econômica e tecnológica da mitigação das mudanças climáticas (EKINS; KESICKI; SMITH, 2011).

Segundo Kesicki (2010), a MACC apresenta, na forma gráfica, o custo associado à última unidade (custo marginal) da redução de emissões de diferentes potenciais de redução de emissões (geralmente em milhões/bilhões de toneladas de CO₂).

Dadas as vantagens das MACC, elas são cada vez mais usadas para descrever opções de abatimento para vários setores e países. Seus resultados podem ser vistos como diretrizes de investimento para consumidores, empresários e políticos (WÄCHTER, 2013).

3.1.3. As MACC e os tipos de políticas

Os formuladores de políticas têm dois amplos tipos de instrumentos disponíveis para mudar hábitos de consumo e produção na sociedade. Eles podem usar incentivos econômicos que são dependentes das forças do mercado para corrigir o comportamento do produtor e do consumidor — sendo chamadas de políticas baseadas no mercado — ou podem usar abordagens reguladoras tradicionais — algumas vezes chamadas de abordagens de comando e controle — que estabelecem padrões específicos entre os poluidores (EPA, 2010).

Kesicki (2010) divide os instrumentos de política climática em: baseados em incentivos e não baseados em incentivos, sendo estas apenas duas classificações entre outras possíveis.

Os instrumentos baseados em incentivos não especificam uma solução, mas permitem ao mercado decidir como reduzir as emissões de CO₂ e, quando comparados aos instrumentos de regulação, geralmente, demandam um custo global mais baixo para atingir o mesmo objetivo de redução (KESICKI, 2010).

Os instrumentos baseados em incentivos, segundo Kesicki (2010), podem ser divididos em instrumentos baseados em preços e quantitativos. Nesse contexto, as MACC

podem ajudar na tomada de decisão no que tange à introdução de um imposto sobre o CO₂ (baseado nos preços) e à introdução de um sistema de quotas de emissão de CO₂ (baseado na quantidade). Uma MACC mostra de forma simples a quantidade de redução que pode ser esperada com a introdução de um imposto de CO₂ em diferentes níveis e, também, mostra o preço resultante de quotas de emissão de CO₂ associado à introdução de um sistema de limite de emissões e comércio (*cap-and-trade*) (KESICKI, 2010).

No sistema *cap-and-trade*, o governo define o nível de emissões agregadas, distribuem-se licenças de emissão para os poluidores e estabelece-se um mercado no qual as licenças podem ser compradas ou vendidas. O preço das licenças de emissão pode variar. Como poluidores diferentes incorrem em custos de redução privados diferentes para controlar as emissões, eles estão dispostos a pagar montantes diferentes nestas licenças. Por conseguinte, um sistema de limitação e comércio permite aos poluidores que enfrentam custos de redução marginais elevados comprarem licenças de poluidores com baixos custos marginais de redução, em vez de instalarem equipamentos de controle de poluição caros ou utilizarem insumos mais caros. Os sistemas de *cap-and-trade* diferem dos regulamentos de comando e controle pelo fato de que procuram limitar o nível de emissão ao longo de um período de conformidade ao invés de estabelecer uma taxa de emissões (EPA, 2010).

Com relação aos instrumentos não baseados em incentivos, Kesicki (2010) os classifica em dois tipos: as políticas de comando e controle, e as políticas de pesquisa, desenvolvimento e implantação.

As políticas de comando e controle não dão ao mercado uma escolha, mas impõem regulação sobre tecnologias ou setores específicos. São, em teoria, menos eficientes do que os mecanismos de mercado, mas podem ser necessárias quando existem imperfeições no mercado, tais como: falta de informação, incentivos divididos ou custos ocultos (KESICKI, 2010).

As MACC, neste âmbito, podem fornecer orientação aos tomadores de decisão sobre o potencial de redução máxima e os benefícios financeiros de medidas “*no regrets*” (medidas que poderiam ser rentáveis e simultaneamente reduzir as emissões de CO₂) uma vez que as distorções do mercado sejam superadas. Elas também podem facilitar a configuração dos níveis de subsídio necessários como, por exemplo, para a utilização de biocombustíveis (KESICKI, 2010).

As políticas de investigação, desenvolvimento e implantação, por sua vez, destinam-se, essencialmente, a promover a inovação e a reduzir os custos das tecnologias. Um exemplo é o financiamento de pesquisas em universidade para criação de novas tecnologias. As políticas de implantação visam tecnologias já existentes no mercado, a fim de facilitar a sua entrada nestes. Podem ser divididos em incentivos baseados em preços (como incentivos fiscais ou redução de impostos) ou baseados em quantidade (como regulamentos para produção de eletricidade a partir de energias renováveis) (KESICKI, 2010).

Assim, baseando-se na discussão anterior, na Figura 2, tem-se uma sugestão da utilidade das MACC na formulação de políticas climáticas.

Figura 2: Uma MACC e sugestões de instrumentos de política climática, conforme região da curva.
Fonte: Kesicki (2010).

Segundo Kesicki (2010) a parte esquerda da MACC (Figura 2) favorece a implantação de políticas de comando e controle, oferecendo potenciais de redução para tecnologias “no regrets” uma vez superadas barreiras como falta de informação, incentivos divididos ou custos ocultos. A parte central da curva é mais voltada à implementação de políticas baseadas em incentivos (mercado). Já a parte da direita indica as informações necessárias para a instalação de políticas de investigação e implantação, que promovam a inovação.

As três categorias de instrumentos de política não estão restritas à sua seção, podendo, inclusive, sobrepor-se.

3.1.4. Os tipos de MACC

O termo "curva MAC" (ou MACC) refere-se na literatura a várias curvas, construídas de várias maneiras (VOGT-SCHILB; HALLEGATTE, 2014), podendo apresentar-se sob uma variedade de formas e diferir conforme a região, escopo, período considerado, setores incluídos e tipo de abordagem (KESICKI, 2010).

Nas seções 3.1.4.1 a 3.1.4.2 há alguns exemplos de tipos MACC existentes, conforme alguns dos trabalhos consultados. É importante mencionar que estes são tipos de classificação genéricos, podendo haver outras classificações diferentes e MACC que não se enquadram em nenhuma destas categorias.

3.1.4.1. MACC baseadas em especialistas e modelo-derivadas

Segundo Kesicki (2010) as MACC podem ser divididas em curvas baseadas em especialistas (*expert-based*, em inglês) e modelo derivadas (*model-derived*, em inglês). Na Figura 3 há um exemplo comparativo destes dois tipos de MACC. Nas seções 3.1.4.1.1 e 3.1.4.1.2 tem-se a explicação das particularidades de cada uma delas.

Figura 3: Comparação entre uma MACC baseada em especialistas (à esquerda) e uma MACC modelo-derivada (à direita).

Fonte: Kesicki (2010).

3.1.4.1.1. MACC baseadas em especialistas

As MACC baseadas em especialistas (BE), também chamadas de curvas de custos tecnológicos, baseiam-se em hipóteses desenvolvidas por peritos para o cálculo das emissões do cenário de referência, do potencial de redução das emissões e do custo de cada medida de mitigação (classificadas em ordem crescente de custo). Conforme a taxa de desconto utilizada e da consideração de subsídios e impostos, pode-se diferenciar as curvas BE sob uma perspectiva privada e ou da sociedade (KESICKI, 2010).

Szklo; Schaeffer e de Gouvello (2010) referem-se a esse tipo de curvas como MACC no nível “tecnológico/atividade”, referindo-se ao foco com o qual são construídas. Tais curvas, segundo tais autores, necessitam de técnicas e modelos simplificados, como nas análises de custo-benefício. Embora sejam curvas que precisam de menor quantidade de dados para sua construção, elas não captam os impactos das opções tecnológicas de mitigação na economia como um todo (já que não abordam aspectos macroeconômicos).

A principal vantagem deste tipo de curva é a facilidade de leitura, sendo os custos e o potencial de abatimento associados de forma clara à sua medida de mitigação correspondente. Pode-se, também, detalhar cada tecnologia e incluir impostos e subsídios existentes em sua avaliação (KESICKI, 2010).

No entanto, tais curvas, não consideram aspectos comportamentais, nem barreiras institucionais ou de implementação. Medidas que podem economizar dinheiro só podem ser realizadas uma vez superadas as distorções do mercado. Estas distorções podem assumir a forma de incentivos difusos, falta de informação e grandes investimentos seguidos de um longo período de recuperação. Além disso, as MACC BE não são capazes de capturar adequadamente as interações entre as medidas de redução e as interdependências comportamentais (KESICKI, 2010).

Muitas vezes estas MACC atribuem apenas um nível de custo a uma tecnologia. Isto pode ser prejudicial para casos nos quais, por exemplo, há muitas fontes de energia renováveis, como a fotovoltaica ou a eólica, havendo diversas “etapas” para calcular os custos, que dependem da localização, das capacidades de geração e das condições ambientais (KESICKI, 2010).

As MACC BE consideram apenas uma seleção de tecnologias, com maior probabilidade de implementação, o que pode excluir tecnologias promissoras no futuro.

Além disso, em estudos setoriais (como o de transportes) pode surgir um problema quando os custos de mitigação são implementados a partir das perspectivas de diferentes tomadores de decisão, não havendo a possibilidade de acumulação de custos de abatimento entre os setores (KESICKI, 2010).

Pode haver, também, inconsistências nas suposições feitas durante a construção do cenário de referência. O cálculo do potencial de redução e do custo marginal é realizado por comparação ao cenário de referência. Logo, é importante adaptar o cenário de referência, incluindo medidas que já foram implementadas, a fim de evitar a dupla contagem (KESICKI, 2010).

A quantidade reduzida e o “percurso” de redução das emissões antes e depois do momento considerado têm um impacto significativo na MACC. Isso é causado pela possível redução de custos causada pela “aprendizagem tecnológica” e pela variação das expectativas em relação ao futuro (KESICKI, 2010).

As curvas BE, que resumem os custos de abatimento e os potenciais de datas no futuro, estão sujeitas a grandes incertezas quanto aos parâmetros financeiros (custos da tecnologia, preços de energia e taxas de descontos) e tecnológicos (KESICKI, 2010).

3.1.4.1.2. MACC modelo-derivadas

As MACC modelo-derivadas (MD) são construídas derivando-se o custo e o potencial de mitigação de emissões de modelos de energia (KESICKI, 2010).

A principal vantagem das MACC MD é que as medidas de mitigação são avaliadas conjuntamente otimizando ou simulando fluxos de energia em todo o sistema, o que acaba por evitar inconsistências e permite a consideração de interações entre as medidas de mitigação, bem como interações intertemporais e intersetoriais (KESICKI, 2013).

Podem ser utilizadas uma grande variedade de técnicas para a construção destas MACC, no entanto, o modo mais comum de construí-las é através de modelos que utilizam a abordagem *top-down* (orientados para a economia) ou a abordagem *bottom-up* (orientados à engenharia). A apresentação gráfica deste tipo de MACC geralmente não contém qualquer detalhe tecnológico (KESICKI, 2010).

Em ambos os casos (*top-down* e *bottom-up*), as curvas são geradas sumarizando o preço de CO₂ resultante de diferentes e rigorosos limites de emissão ou, de modo inverso, sumarizando o nível de emissões resultante de diferentes preços de CO₂ (KESICKI, 2010).

Szklo; Schaeffer e de Gouvello (2010) descrevem de forma semelhante à de Kesicki (2010) as MACC MD que utilizam as abordagens *bottom-up* e *top-down*, porém denominando ambas, respectivamente, como MACC com foco “setorial/programa” e MACC com foco “econômico”.

É importante mencionar que nem todos os modelos se encaixam perfeitamente em uma destas duas categorias, havendo diversos "modelos híbridos" que combinam as características dos modelos *bottom-up* e *top down*. Desta maneira, as diferenças nos resultados são cada vez mais resultantes das diferenças nos pressupostos de entrada do que diferenças na estrutura do modelo (BRUCE *et al.*, 1996).

Suposições sobre outros fatores chave de entrada, como níveis de emissão do cenário de referência, geralmente são mais importantes do que a estrutura do modelo (KESICKI, 2010).

Contudo, para que questões políticas sejam melhor entendidas, é importante diferenciar tais modelos (BRUCE *et al.*, 1996).

3.1.4.1.2.1. Abordagens Bottom-up versus Top-down

A abordagem *bottom-up* baseia-se em dados tecnológicos e setoriais e, sobretudo, em indicadores físicos, enquanto que a abordagem *top-down* descreve processos dentro da economia como um todo, incluindo interações com base no comportamento histórico (HOOGWIJK *et al.*, 2010).

A abordagem *bottom-up* busca tecnologias e práticas que visem à redução das emissões de GEE, incluindo seus custos e fatores de limitação, sendo avaliadas diversas medidas de redução de GEE nas quais o escopo dos setores e as opções de mitigação analisadas diferem amplamente (WÄCHTER, 2013). Esta abordagem é mais realista, pois considera os efeitos setoriais e/ou subsetoriais, embora ignore os efeitos em toda a economia. Ela requer modelos setoriais e/ou subsetoriais que podem necessitar de grande

quantidade de dados. Os efeitos entre os setores, contudo, não são incluídos nesta abordagem (SZKLO; SCHAEFFER; DE GOUVELLO, 2010).

Desta maneira, os modelos *bottom-up* são, tradicionalmente, ricos em detalhes técnicos, porém pobres na modelagem do comportamento microeconômico e do *feedback* macroeconômico (KUIK; BRANDER; TOL, 2009).

Modelos de energia *bottom-up* são modelos de equilíbrio parcial (KESICKI, 2010) e geralmente, ferramentas de otimização, como de programação linear e programação dinâmica são utilizadas para gerar o cenário de referência e os cenários de baixo carbono (SZKLO; SCHAEFFER; DE GOUVELLO, 2010).

O modelo Regional de Energia de Metas Energéticas (TIMER)¹⁴ é um exemplo de modelo *bottom-up* usado para derivar MACC (VAN VUUREN *et al.*, 2004).

Apesar do seu caráter rico em tecnologia, as MACC geradas por modelos *bottom-up* não apresentam qualquer detalhe tecnológico na representação gráfica da curva de redução, não consideram interdependências em toda a economia e os custos marginais de redução podem ser diluídos por outras restrições (KESICKI, 2013).

Os modelos *top-down*, por sua vez, basicamente, analisam comportamentos agregados baseados em índices econômicos de preços e elasticidades (BRUCE *et al.*, 1996). Estas elasticidades geralmente são estimadas com base em taxas históricas as quais se supõe serem válidas para o futuro (KESICKI, 2010).

Os modelos *top-down* levam em conta tanto os efeitos diretos quanto os efeitos indiretos de uma medida de mitigação em toda a economia (SZKLO; SCHAEFFER; DE GOUVELLO, 2010).

A abordagem *top-down* baseia-se em modelos microeconômicos agregados. Os modelos são, na maioria das vezes, modelos de equilíbrio geral computável (CGE)¹⁵ que podem conter uma representação detalhada do setor de energia. Os custos marginais de abatimento aumentam de acordo com a severidade da restrição. São obtidas curvas marginais de custos de abatimento, quando são gerados os custos associados a diferentes

¹⁴ O TIMER é um modelo de sistema energético que se concentra em várias relações dinâmicas dentro do sistema energético, como o esgotamento dos combustíveis fósseis e o comércio entre as diferentes regiões (KESICKI, 2010).

¹⁵ O modelo de Previsão de Emissão e Análise de Políticas (EPPA) pertence à classe de modelos de CGE que mapeiam os fluxos de produtos, serviços e dinheiro em toda a economia (KESICKI, 2010). Ele foi o primeiro modelo *top-down* a ser usado para derivar uma MACC (ELLERMAN e DECAUX, 1998).

níveis de reduções (KLEPPER; PETERSON, 2006) e seus resultados dependem das estruturas e suposições do modelo (ANDERSON, 2006).

Os inconvenientes das MACC geradas pelos modelos *top-down* incluem a falta de detalhes tecnológicos no modelo, o desrespeito às distorções do mercado e a dependência de dados históricos para o cálculo de custos de redução futuros (KESICKI, 2013). Tais modelos não podem ilustrar explicitamente as tecnologias utilizadas para a redução das emissões devido ao seu carácter agregado (KESICKI, 2010). Outro inconveniente é que, embora os custos de abatimento obtidos utilizando esta modelagem possam ser mais realistas, a modelagem se restringe aos dados disponíveis e, a interpretação dos resultados do modelo, requer que os avaliadores tenham conhecimentos sobre economia (SZKLO; SCHAEFFER; DE GOUVELLO, 2010).

Devido a ambos os tipos de modelos assumirem agentes racionais com comportamento custo-efetivo, as distorções do mercado não podem ser representadas nestes modelos de otimização. O resultado é que estes modelos não apresentam custos de redução negativos. No entanto, nos modelos *bottom-up* é possível incorporar maiores taxas de obstáculos e limites superiores para o uso de tecnologias de mitigação para representar problemas ligados a altos custos iniciais de investimento e outras distorções no que se refere a medidas “*no regrets*”¹⁶ (KESICKI, 2010).

Apesar dos modelos *top-down* e *bottom-up* nem sempre levarem em consideração as interações entre as medidas de mitigação, a geração de MACC com ambos os tipos de modelo tem certas vantagens, como a possibilidade de englobar as interações intertemporais e trajetórias de emissão do cenário de referência em seu escopo além de, geralmente, os modelos serem mais capazes de representar incertezas (KESICKI, 2010).

A partir da década de 70 ocorreram muitos debates sobre as vantagens e desvantagens relativas das abordagens *top-down* e *bottom-up* na modelagem de interações energia-economia (KUIK; BRANDER; TOL, 2009). Estas discussões têm se estendido para a área de economia de mudança climática. Tem havido, contudo, uma convergência para um ponto intermediário entre as duas abordagens ("modelagem híbrida") (HOURCADE

¹⁶ As vias do sistema de energia que são projetadas para fornecer o menor custo possível de implantação, combinadas com as baixas emissões de gases de efeito estufa (GEE), geralmente são consideradas como opções de "sem arrependimentos" (KONADU *et al.*, 2015).

et al., 2006). No entanto, ainda existem diferenças entre estas abordagens que podem afetar a avaliação dos custos de abatimento (KUIK; BRANDER; TOL, 2009).

3.1.4.2. *MACC medidas explícitas (potencial-total ou potencial-alcançável)*

Vogt-Schilb e Hallegatte (2014) trazem uma definição semelhante às das curvas baseadas em especialistas, porém, denominando as MACC que trazem informações sobre custos de redução e potenciais para um conjunto de medidas de mitigação de "medidas explícitas". Tais medidas, segundo os autores, incluem a mudança de tecnologias em setores como o de transporte, habitação e energia e, também, opções não tecnológicas como a reciclagem de resíduos e a gestão do uso da terra e da floresta. Estas MACC geralmente são construídas para um país ou região específicos, e para uma data específica e relatam potenciais de redução em função do custo de redução, classificando as opções de mitigação do menor para o maior custo (VOGT-SCHILB e HALLEGATTE, 2014).

Segundo Vogt-Schilb; Hallegatte; de Gouvello (2014) as MACC medidas-explícitas podem ser divididas em dois tipos, conforme seu potencial de abatimento das emissões: as de "potencial-total" (*full potential*, em inglês) e as de "potencial-alcançável" (*achievable potential*, em inglês).

As MACC de "potencial-total" fornecem informações sobre a quantidade de emissões evitadas se a tecnologia de baixo carbono for utilizada em seu máximo potencial técnico. É calculada utilizando-se uma tecnologia de referência (ou linha de base), tendo em conta a intensidade de carbono e a substituição imperfeita das diferentes tecnologias. O principal valor deste tipo de curva é descritivo, uma vez que destaca quanto algumas medidas-chave poderiam reduzir as emissões a longo prazo. Um exemplo desta abordagem é qual fração de veículos de passageiros pode ser substituída por veículos elétricos. Supondo que as emissões do cenário de referência, provenientes dos veículos, seja de 140 g/km e as emissões de veículos elétricos seja igual a zero, pode-se calcular a quantidade de emissões evitáveis pelo uso dos veículos elétricos. Um problema de operacionalidade desta abordagem é que ela não leva em consideração a velocidade de implementação destas tecnologias (VOGT-SCHILB; HALLEGATTE; DE GOUVELLO, 2014).

Já as MACC “potencial-alcançável” têm uma dimensão prospectiva, uma vez que são construídas para uma data futura. Esta abordagem reconhece que a difusão em larga escala de novas tecnologias pode levar décadas (WILSON *et al.*, 2013). Neste contexto, o potencial de mitigação de uma tecnologia é o abatimento alcançado se ela fosse implementada a uma determinada velocidade, iniciando numa data (MCKINSEY, 2009). Esta abordagem leva em conta, por exemplo, que mesmo havendo incentivos fiscais ambiciosos a favor dos veículos elétricos, haveria um aumento limitado das vendas, resultando num potencial limitado de redução de emissões. Tomando-se como exemplo a reabilitação de edifícios residenciais, uma fraqueza deste tipo de abordagem é que não fica claro na MACC resultante se o pequeno potencial de redução, oriundo da reabilitação dos edifícios, significa que os edifícios residenciais já estão quase totalmente reabilitados (o potencial total é baixo) ou apenas um pequeno número deles pode ser reformado durante o período considerado. Já como vantagem, destaca-se que neste tipo de abordagem é necessário investigar suposições razoáveis sobre a possível velocidade de implementação de uma medida (por exemplo, 1% das habitações podem ser restabelecidas anualmente). Contudo, tais velocidades de difusão avaliadas não são apresentadas na MACC resultante e raramente são discutidas nos relatórios anexos, o que prejudica a tomada de decisão (VOGT-SCHILB; HALLEGATTE; DE GOUVELLO, 2014).

3.1.5. Limitações e aspectos importantes sobre as MACC

As MACC são importantes ferramentas para a tomada de decisão, mas possuem certas limitações e/ou particularidades que devem ser consideradas ao utilizá-las.

Pode-se citar, entre elas, a influência de uma medida de baixo carbono sobre a outra. Quando a implementação de uma medida reduz o custo de implementação de outra, diz-se que esta é uma medida “complementar”. Um exemplo de medida complementar é a implementação de medidas inteligentes para o crescimento no setor de transporte e que podem reduzir o custo ou aumentar a eficácia do transporte de massa, reduzindo as emissões (SWEENEY; WEYANT, 2008).

Já algumas medidas podem não ser tão viáveis na presença de outras, sendo estas as chamadas medidas “substituíveis”. Quaisquer medidas que competem entre si são substituíveis, em parte ou inteiramente. Por exemplo, uma medida para promover

veículos de bateria elétrica pode competir contra uma medida para promover veículos movidos à hidrogênio, de modo que as reduções de emissões de cada uma das duas medidas quando ambas são implementadas, são menores que as reduções de emissões de cada medida sozinha (SWEENEY; WEYANT, 2008).

Segundo Vogt-Schilb; Hallegatte e de Gouvello (2014), as curvas do MAC não relatam uma parte muito importante da informação, que é a velocidade de implementação de cada medida e opção.

Vogt-Schilb; Hallegatte e de Gouvello (2014) reanalisando uma MACC desenvolvida pelo Banco Mundial no Brasil (DE GOUVELLO, 2010) enfatizam a problemática enfrentada pelos tomadores de decisão, que possuem metas de redução de emissões e precisam decidir quais medidas devem ser implementadas e em que ordem. Segundo Vogt-Schilb; Hallegatte e de Gouvello (2014) a má interpretação das MACC e o foco em metas de curto prazo levariam a um baixo investimento em opções caras, de longo prazo e de grande potencial de reduzir emissões. Os autores afirmam que projetar políticas de mitigação do clima pode ser feito através de uma combinação pragmática de duas abordagens que são a de sinergia e a de urgência. A abordagem de sinergia, identifica as opções de mitigação mais econômicas (menores custos) e aquelas que proporcionam co-benefícios em termos de desenvolvimento como, por exemplo, o crescimento econômico, a geração de empregos, a melhoria na qualidade ambiental e a redução da pobreza. Já a abordagem de urgência visa à redução das emissões a longo prazo e identifica ações que precisam ser implementadas o quanto antes para que esse cenário seja alcançado.

Ainda de acordo com Vogt-Schilb; Hallegatte; de Gouvello (2014) as MACC “medidas explícitas”¹⁷ mostraram-se extremamente eficazes ao comunicar alguns resultados relacionados à economia na mitigação de GEE aos tomadores de decisão e ao público em geral. Ao se relatar o custo e o potencial de uma lista de medidas de mitigação, as MACC ilustram de forma simples, por exemplo, o porquê da eficiência energética ser uma opção chave (economiza grandes quantidades de GEE a um custo baixo ou negativo), entretanto, as MACC existentes não explicam porque as opções mais caras, como a captura e armazenamento de carbono (CCS) ou a utilização de energia renovável, devem receber atenção especial atualmente. Segundo Grubler *et al.*, (1999) estas opções podem diminuir grandes quantidades de GEE no futuro e necessitam de tempo para serem implementadas.

¹⁷ Vide descrição na seção 3.1.4.2 desta dissertação.

Há que se considerar também as incertezas na quantificação ou na previsão de tecnologias ou políticas futuras. Pode-se haver incertezas: na obtenção dos custos ou quantidade de redução de emissão das medidas, no desenvolvimento de novas tecnologias, no estabelecimento da influência de políticas ou regulamentações, na precisão ou acurácia das estimativas, etc. (SWEENEY; WEYANT, 2008). Wächter (2013) chama a atenção de que o cálculo de uma quantia específica de dinheiro que deve ser investido para atingir um certo potencial de redução não leva em conta a taxa de difusão das tecnologias. Estas incertezas, quando combinadas, implicam que qualquer MACC deve ser vista não como uma estimativa exata, mas passível de erros implícitos (SWEENEY; WEYANT, 2008).

Na etapa de construção do cenário de referência, pode-se subestimar ou superestimar as emissões. Neste caso, as reduções de emissões necessárias podem ser significativamente diferentes das reduções de emissões estimadas. As MACC podem ser bastante sensíveis aos pressupostos básicos da análise. Um exemplo deste caso é a mudança dos futuros preços de combustíveis fósseis, que pode afetar a rentabilidade de diversas medidas, sobretudo aquelas relacionadas a transportes (SWEENEY; WEYANT, 2008).

Klepper e Peterson (2006) utilizando um modelo de equilíbrio geral computável (CGE) para simulações quantitativas, demonstram teórica e empiricamente, como as MACC dependem dos níveis de redução no restante do mundo por meio de mudanças nos preços internacionais dos combustíveis fósseis e essa diferença nos preços atinge uma magnitude que, segundo os autores, não pode ser negligenciada.

A viabilidade de uma medida também é importante. Para que uma medida seja viável, ela deve ser tecnologicamente viável, entretanto, a viabilidade também implica que as medidas devem satisfazer outros critérios razoáveis para as políticas, não impactando desproporcionalmente as comunidades de baixa renda; não interferindo na realização de outras políticas, como a poluição do ar; minimizando a carga administrativa e a ocorrência de *leakage*¹⁸; entre outros (SWEENEY; WEYANT, 2008).

¹⁸ *Leakage* pode ser traduzido como "fuga" de carbono e refere-se à situação que pode ocorrer se, por razões de custos relacionados a políticas climáticas, as empresas transferissem sua produção para países com políticas relacionadas às emissões menos severas. Isso poderia levar a um aumento das emissões totais destes países (EUROPEAN COMMISSION, [s.d]).

As tecnologias de redução também devem ser compatíveis com as tecnologias atuais ou com uma certa mistura de tecnologias, caso contrário isto pode levar ao aumento dos custos na implementação da tecnologia (DEL RÍO GONZÁLEZ, 2008). Além disso, algumas tecnologias são mais caras em determinadas regiões (WÄCHTER, 2013).

Uma medida deve ser administrativamente viável. Uma medida que parece custar menos do que o custo marginal associado às reduções de emissões pretendidas, mas que seria impossível de administrar, não deve ser considerada viável e, portanto, não seria rentável. Medidas com custos administrativos elevados também não podem ser consideradas rentáveis. Nesse caso, os custos administrativos podem ser incluídos no custo das medidas de emissões. Quando uma medida custa menos que o custo marginal associado às emissões-alvo, mas coloca um ônus desproporcional dos custos sobre as famílias de baixa renda ou de minorias, esta pode não ser considerada viável. Pode ser possível implementar medidas auxiliares para reduzir as questões de equidade censuráveis, sendo que o custo destas medidas acessórias deve ser incluído no custo da medida proposta (SWEENEY; WEYANT, 2008).

A classificação das medidas por custos pode estimular a implementação das tecnologias mais econômicas, em termos monetários, e com menor potencial de redução total comparadas àquelas com maior potencial de redução em termos absolutos. Um exemplo é a implementação de iluminação de baixa energia, que possuem custo de abatimento e potencial de redução baixos. Nesse caso, deve haver aconselhamento político para que se incluam medidas de elevado potencial tecnológico, como sistemas fotovoltaicos, a fim de atingir os objetivos de atenuação e reduzir os custos através do aumento da difusão destas tecnologias no mercado (WÄCHTER, 2013).

Outra limitação das MACC é que, como estas são constituídas por análises separadas de muitas medidas, pode ser difícil garantir que as avaliações das diferentes medidas sejam consistentes (SWEENEY; WEYANT, 2008).

Outro aspecto importante a se considerar, relacionado à eficiência energética das medidas, é que a produção de certos dispositivos mais eficientes energeticamente demanda, muitas vezes, grande quantidade de energia. Assim, há aumento das emissões decorrentes da produção destes dispositivos. Isso deve ser considerado pelos tomadores de decisão (SONNTAG e SCHUBERT, 2008) e quantificado na contabilidade de emissões.

As MACC também ignoram quaisquer efeitos de equilíbrio geral, no qual a política que afeta um mercado influencia os preços de toda a economia e pode ter um efeito de ondulação em outros mercados. Um exemplo seria se houvesse elevação do preço dos combustíveis fósseis, de modo a elevar o nível médio dos preços na economia. Uma vez que os salários reais diminuem se o nível médio de preços em toda a economia aumenta, os trabalhadores fornecerão menos mão-de-obra na economia, exacerbando a distorção pré-existente do imposto sobre o rendimento (BOVENBERG e GOULDER, 2000). Logo, uma política do mercado de combustíveis fósseis pode ter efeitos maiores (SWEENEY; WEYANT, 2008).

Outra situação relacionada ao preço da energia seria o fato de que quando há aumento no preço dos combustíveis fósseis, pode haver favorecimento na adoção de medidas de baixo carbono — sendo o contrário também verdadeiro — o que tornaria o incentivo financeiro a essas tecnologias mais fraco (WATCHER, 2013).

O potencial de redução de emissões depende, também, da fonte utilizada para a produção de eletricidade. Logo, quando as emissões do processo de produção de eletricidade diminuem, naturalmente o potencial de redução de qualquer medida de mitigação adicional também diminui e isso aumenta os custos, pois há menor potencial a ser reduzido (WATCHER, 2013).

Segundo Wächter (2013) um dos pontos fortes das MACC reside em sua capacidade para destacar medidas de eficiência energética que podem ter custos de redução negativos. Os pontos fracos, entretanto, consistem em negligenciar uma mudança nos preços da energia, a taxa de difusão e a compatibilidade com as tecnologias existentes.

Com relação aos relatórios presentes em estudos MACC, para Vogt-Schilb e Hallegatte (2014) eles poderiam ser melhorados pelo fornecimento de avaliações do custo, potencial e velocidade de implementação de cada opção. Com essas informações, o cronograma de implementação das tecnologias poderia ser avaliado em conjunto com modelos lineares (mais simples) ou modelos de avaliação integrada de última geração, fornecendo números para criação ou revisão de políticas setoriais.

3.1.6. Estudos MACC para indústrias (internacionais e brasileiras)

Na literatura há diversos estudos MACC mostrando um grande potencial de redução de emissões de GEE no setor industrial ao se adotar tecnologias de baixo carbono.

Selvakkumaran *et al.* (2014) dividiu o setor industrial tailandês em nove subsetores, baseando-se em procedimentos de relatórios econômicos nacionais, com o intuito de estimar o potencial de mitigação para o período de 2010 a 2050, usando os princípios da *Low Carbon Society* (LCS) e abordando, também, o imposto sobre as emissões como um fator chave para a mitigação de GEE, junto à análise do custo marginal de abatimento. Em seguida, o autor analisou o impacto da mitigação na segurança energética do setor industrial. Seus resultados sugerem que o potencial de mitigação em 2050, em comparação com o cenário de referência, é de cerca de 20%, com impactos positivos na segurança energética do país. A segurança energética engloba os indicadores: participação do petróleo, intensidade da energia primária, intensidade do carbono e, a diversificação da quota de combustíveis (SELVAKKUMARAN *et al.*, 2014).

No caso da indústria de cimento, Hasanbeigi *et al.* (2010 [a]) construiu uma curva de custo de abatimento de CO₂ de baixo para cima (*bottom-up*) para a indústria tailandesa de cimento (setor que, em 2005, emitiu cerca de 20.633 ktCO₂). Foram analisadas 41 tecnologias e medidas de redução de CO₂, para o período de 2010 a 2025. O potencial total anual de redução de CO₂ encontrado foi de 3.143 ktCO₂/ano, o que representa cerca de 15,2% das emissões totais de CO₂ da indústria tailandesa (em 2005). O estudo também encontrou que mais de 98% do total potencial de redução técnica das tecnologias propostas é custo-efetivo, embora afirme que os resultados de custo eficácia das tecnologias individuais possam variar conforme estudos (mesmo aqueles que utilizam metodologias semelhantes) em virtude de diversas variáveis, como o preço da energia, a escolha da taxa de desconto e o país considerado.

Para a siderurgia, pode-se citar o estudo realizado por Wang *et al.* (2007). Nele foi desenvolvido um modelo utilizando o *software* LEAP¹⁹ para gerar três diferentes cenários

¹⁹ O LEAP (Sistema de Planejamento Alternativo de Energia de Longo Alcance) é uma ferramenta de *software* baseada em cenários para a análise integrada de energia-ambiente e de mitigação de gases de efeito estufa. Foi desenvolvida pelo Instituto de Meio Ambiente de Estocolmo (SEI). Seus cenários são baseados em uma contabilidade abrangente de como a energia é consumida, convertida e produzida em uma determinada região ou economia sob uma série de suposições alternativas sobre população, desenvolvimento econômico, tecnologia, preço e assim por diante. Ao contrário dos modelos

(1, 2 e 3) de emissões de CO₂ para avaliar o potencial de redução na indústria siderúrgica chinesa, no período de 2000 a 2030. O Cenário 1 levou em consideração as políticas industriais adotadas antes de 2000. O Cenário 2 levou em conta as políticas adotadas entre 2000 e 2005. O Cenário 3 (também chamado de Cenário de Mitigação), englobou objetivos mais ambiciosos de redução de emissões e de políticas. Os resultados mostraram que a redução média de CO₂ por ano, nos cenários de “política recente” e “nova política”, em relação ao cenário de referência é de, respectivamente, 51 e 107 milhões de toneladas. Os custos incrementais totais correspondentes são 9,34 e 80,95 bilhões de dólares. O estudo concluiu que existe um grande potencial de redução de CO₂ na indústria siderúrgica chinesa e que é necessário o ajuste na estrutura da indústria e no avanço tecnológico (WANG *et al.*, 2007).

No âmbito brasileiro, no Estudo de Baixo Carbono para o Brasil (DE GOUVELLO, 2010), financiado pelo Banco Mundial realizou-se um estudo englobando os setores LULUCF, Energia, Transportes e Manejo de resíduos, para os anos entre 2010 e 2030. Além das tecnologias de baixo carbono propostas para tais setores, o estudo estimou o financiamento necessário para implementá-las. Como resultado o setor industrial (inserido no setor de Energia), grande utilizador de combustíveis fósseis, responderia por 75% das reduções até 2030 (68 MtCO₂/ano), devendo-se, para tanto, dar prioridade à eliminação do uso industrial de biomassa não renovável.

Henriques, Dantas e Schaeffer (2010) em seu estudo, discutiram o potencial para reduzir as emissões do uso de energia pelo setor industrial brasileiro em um cenário de baixo carbono projetado até 2030 e os custos para tanto, separados por: investimento, operação e manutenção, de energia e receitas. Em relação a um cenário de referência projetado para 2030, a redução das emissões de CO₂ poderia atingir 43%, ao se adotar medidas de eficiência energética, reciclagem de materiais e cogeração, passando de combustíveis fósseis para energias renováveis e menos poluentes e eliminando a biomassa de desmatamento. Tais medidas trariam reduções de emissões de quase 1,5 bilhões de tCO₂ em um período de 20 anos (2010-2030), demandando grandes investimentos financeiros e trazendo um considerável retorno econômico, inclusive, com

macroeconômicos, o *software* não tenta estimar o impacto das políticas energéticas sobre o PIB ou o emprego, embora esses modelos possam ser executados em conjunto com o LEAP. Ele também não gera automaticamente cenários de equilíbrio ótimo ou de equilíbrio de mercado, embora possa ser usado para identificar cenários de custo mínimo. O procedimento analítico do LEAP pode ser resumido em cinco etapas: projeção de produção setorial, demanda de energia correspondente, emissões de CO₂, cálculo de custo total, poupança de energia e cálculo do potencial de redução de CO₂ (WANG *et al.*, 2007).

custos de redução negativos. Em muitos casos, entretanto, haveria menor atratividade econômica e maiores custos de redução, exigindo, assim, incentivos mais incisivos.

A Consultoria ICF (2009) também realizou um estudo para o Brasil enfocando as indústrias de cimento do país. Foram criadas MACC projetadas para o ano de 2015 e 2020. As MACC geradas basearam-se na perspectiva dos fabricantes de cimento, excluindo os custos do governo brasileiro para implementação de políticas de apoio. As opções de mitigação avaliadas se enquadraram em quatro categorias: mudanças de processo, combustíveis alternativos, cimentos misturados e conversões de forno. As barreiras para adoção destas tecnologias também foram discutidas. Os resultados, para 2020, indicaram uma redução máxima de 2,99 MMTCO₂e (milhões de toneladas métricas de CO₂e), assumindo que todas as tecnologias disponíveis fossem adotadas.

Outro estudo envolvendo o Brasil, embora não apenas exclusivo para ele, é de Wetzelaer *et al.* (2007) que teve como objetivo identificar o potencial e os custos das opções de redução de emissão de GEE em países não incluídos no Anexo I, com o intuito de desenvolver MACC para a criação de políticas para tais regiões. O estudo incluía os subsetores de cimento e siderurgia nas análises, porém para o Brasil foram estudados apenas os segmentos de produtos agrícolas e silvicultura e, eletricidade. O potencial total de redução de emissões identificado em ambos os segmentos foi de 67,3 MtCO₂e/ano, sendo o maior potencial encontrado para a conservação de energia (35,9 MtCO₂e/ano), seguido de etanol com cogeração de eletricidade (16,9 MtCO₂e/ano) e energia eólica (7 MtCO₂e/ano).

Tatrallyay e Stadelmann (2013) também realizaram um estudo para o Brasil e Índia, incluindo o setor industrial. Nele foram analisadas a eficácia e a eficiência do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e do Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF). A redução realizada e os custos dos dois mecanismos na Índia e no Brasil (usando dados de 28 documentos do projeto GEF e 233 MDL) são comparados com curvas teóricas de custo marginal de abatimento. O resultado é que ambos os mecanismos se concentraram no potencial de redução negativa e de baixo custo, deixando inexplorado um potencial teórico significativo, neste intervalo de custos. O MDL obteve de forma mais efetiva o potencial de redução das emissões de gases industriais e metano, enquanto o GEF destacou-se mais pelas oportunidades de redução de emissão de energia e de eficiência do lado da demanda.

Há também um estudo realizado pela consultoria McKinsey (2009), que avaliou o potencial, os custos e o investimento necessários para mais de 200 oportunidades de

redução de GEE em 10 setores principais (incluindo cimento e ferro e aço) e 21 regiões do mundo (incluindo o Brasil). O estudo resultou numa MACC global e concluiu que existe um potencial para reduzir as emissões de GEE em 35%, em comparação com os níveis de 1990, ou em 70%, em comparação com os níveis a serem vistos em 2030. O ano base do estudo foi 2005.

3.1.7. *Softwares* e bancos de dados de MACC

Segundo Marinoni e Van Grieken (2016) não existem muitas ferramentas disponíveis para produzir MACC com a flexibilidade e a funcionalidade exigidas pelas recentes pesquisas.

Entretanto, na literatura há duas ferramentas que devem ser mencionadas: o *MACTool*® e o *ABATE*®.

O Banco Mundial foi o responsável pelo desenvolvimento do *software MACTool*®, que auxilia na construção das MACC (VOGT-SCHILB; HALLEGATTE; DE GOUVELLO, 2014).

O *MACTool*® toma como insumos os principais parâmetros sócio-técnicos de um conjunto grande de medidas de mitigação e variáveis macroeconômicas. Por exemplo, as opções de tecnologia para produzir eletricidade são caracterizadas pelo capital a ser investido para a implantação e operação da tecnologia, sua vida útil, sua eficiência energética e o tipo de combustível utilizado. É considerada, também, a intensidade de carbono de cada combustível. Nesta ferramenta, deve-se especificar, pelo menos, um cenário sobre as futuras variáveis macroeconômicas de interesse, como o preço dos combustíveis fósseis e a demanda futura de eletricidade. Devem ser fornecidos, também, os cenários de penetração futuros de tecnologias de baixo carbono, tanto no cenário de referência como em, pelo menos um, cenário de redução de emissões. O *MACTool*® gera, então, a quantidade de GEE deixada de se emitir devido à adoção de cada tecnologia a longo do período considerado (em MtCO₂) e o custo para implementá-la (em \$/tCO₂) representados, graficamente, numa MACC (VOGT-SCHILB; HALLEGATTE; DE GOUVELLO, 2014).

É importante mencionar que o *software* não fornece informações sobre a viabilidade das tecnologias. Tal informação deve vir diretamente dos cenários de entrada que devem

ser construídos de modo a contemplar as restrições à difusão da tecnologia e a velocidade de implementação dela. Tais cenários devem provir de modelos que consideram tais restrições ou serem construídos por especialistas do setor, que irão estimar os possíveis cenários de penetração (KESICKI e EKINS, 2012).

O *MACTool*® também relata o investimento necessário em diferentes cenários e o preço necessário para desencadear investimentos do setor privado (VOGT-SCHILB; HALLEGATTE; DE GOUVELLO, 2014).

O *ABATE*®, por sua vez, é um *software* que facilita a produção gráfica das MACC para um volume grande de entidades espaciais. Ele é capaz de ler dados de um arquivo de texto delimitado por tabulações, que pode ser produzido usando qualquer editor de texto ou planilhas, como o *Microsoft Excel*®. Com o *software* é possível preencher individualmente as colunas das MACC com cores, auxiliando na categorização das diferentes medidas de mitigação ou representar outras características, como a incerteza, por exemplo (MARINONI; VAN GRIEKEN, 2016).

O *ABATE*® auxilia na produção final das MACC, entretanto, é necessário grande conhecimento técnico - assim como no caso da *MACTool*® - para se chegar aos seus parâmetros finais geradores (o potencial de redução de emissões e os custos marginais de abatimento).

Com relação a bancos de dados, o Enerdata (2017) disponibiliza (de forma não gratuita) um banco de dados de MACC denominado *EnerFuture MACC*®, que pode ser acessado *online*. A ferramenta é interativa sendo possível aplicar diversos filtros de pesquisa a ela. Os dados podem ser apresentados na forma gráfica de MACC ou tabelas. As tabelas podem ser salvas no formato “.xls” ou “.PDF”.

Esta ferramenta possui dados para diversos países das regiões: Europa, América do Norte, América Latina, Ásia, Pacífico, Países da OECD, Ásia e Pacífico, Oriente Médio e África. Tais dados podem ser consultados, também, agregados em nível mundial.

Os dados não correspondem à uma série histórica temporal, mas às projeções para os anos de 2025, 2030, 2035 e 2040, em diferentes cenários. Os cenários estão divididos em

Ener-Blue, *Ener-Green* e *Ener-Brown*. Cada um destes cenários²⁰ possui uma premissa diferente para sua construção.

É possível configurar a ferramenta para apresentar os dados em diferentes unidades de eletricidade (em GWh ou TWh), energia (ktoe, PJ, TJ, etc.) e moeda (em Euro do ano de 2005 ou de 2012 e, em Dólar, de 2005 ou de 2012).

Na Figura 4 pode ser visto o menu de operação²¹ da ferramenta. A MACC gerada, para o país Romênia, mostra no eixo y as emissões evitadas de CO₂ provenientes da energia, no subsetor de Minerais não metálicos (em ktCO₂). No eixo x estão representados os custos de abatimento (em US\$₀₅/tCO₂). A área sob cada curva representa o custo total de redução. Cada linha do gráfico corresponde a um ano projetado (2025, 2030, 2035, e 2040), no cenário *Ener-Blue*.

²⁰ O cenário *Ener-Blue* baseia-se na realização bem-sucedida dos objetivos para 2030 das INDCs (*intended nationally determined contributions*), conforme anunciado na COP 21. Já o cenário *Ener-Brown* descreve um mundo com preços de energia de combustíveis fóssil duradouros, afetando todo o sistema de energia por um longo período. Neste cenário, os produtos da OPEP continuam a aumentar para manter a sua quota de mercado (ENERDATA, 2017).

²¹ EnerFuture MACC® (Versão de teste). Disponível em <<http://forecasts.enerdata.net/database/>>. Consulta realizada em 21 de março de 2017.

Figura 4: Menu de operação do *EnerFuture MACC®* (versão de teste). A MACC, para o país Romênia, mostra no eixo y as emissões evitadas de CO₂ provenientes da energia, no subsetor de Minerais não-metálicos (em ktCO₂). No eixo x estão representados os custos.

Fonte: Enerdata (2017).

3.2. CONCEITOS SOBRE PRODUÇÃO INDUSTRIAL E EMISSÕES (CIMENTO E SIDERURGIA)

Esta seção engloba uma contextualização sobre os processos industriais relacionados à produção de cimento, ferro e aço, e as emissões de GEE decorrentes destes processos. Ela foi dividida em três subseções sendo a primeira, mais geral, relacionada às emissões industriais (3.2.1) e outras duas, mais específicas, relacionadas às indústrias de cimento (Seção 3.2.1.1) e de siderurgia (Seção 3.2.1.2).

3.2.1. Produção e emissões industriais

A quantidade de emissões do setor industrial pode, em geral, ser decomposta em três termos: produção industrial, consumo de energia por unidade de produção industrial (intensidade energética) e emissões de CO₂ por unidade de consumo de energia (intensidade de carbono). Quando a produção industrial duplica, mantendo-se a intensidade de carbono e de energia constantes, as emissões de CO₂ são também duplicadas (AKASHI *et al.*, 2011).

O setor industrial foi responsável por 21% das emissões globais de GEE, em 2010. As emissões de GEE na indústria envolvem principalmente queima de combustíveis fósseis; emissões de processos de transformação química, metalúrgica e mineral — não associadas ao consumo de energia — e emissões das atividades de gerenciamento de resíduos. As emissões do uso industrial de eletricidade são excluídas, sendo estas quantificadas no setor de eletricidade e produção de calor (IPCC, 2014).

O Brasil, em 2016, era a nona economia do mundo (BANCO MUNDIAL [a], 2018) e, de acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2011), para cada mil reais produzidos no país, eram emitidas 0,72 tCO₂e.

Conforme o relatório de “Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil” (MCTI, 2014 [a]), do total de emissões de CO₂e, no ano de 2012, o setor de Energia brasileiro contribuiu com 37% destas emissões, enquanto que o setor de Processos Industriais foi responsável por 7% delas.

Dados do relatório de “Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil” (MCTI, 2014 [a]) destacam que, em 2012, a contribuição para as emissões de CO₂e, no setor de Processos Industriais, foi de 42,9% para a produção de ferro-gusa e aço; 29,6% para a produção de cimento; 7,5% para a produção de cal.

3.2.1.1. Indústria Cimenteira

Em 2013 a produção mundial de cimento foi de, aproximadamente, 4.000 Mt (USGS, 2014).

Estima-se que em 2020, a produção de cimento seja de aproximadamente 3,5 bilhões de toneladas métricas de emissões de CO₂, com a maior parte do crescimento vindo da região da Ásia e Pacífico (SWEENEY; WEYANT, 2008).

As indústrias de minerais não-metálicos, que incluem a indústria do cimento, representam 12% do consumo de energia das indústrias mundiais (IEA, 2007).

Em 2016 o parque produtor de cimento brasileiro contava com 100 fábricas, controladas por 24 grupos industriais (SNIC, 2017 [a]), sendo que, quase todas as plantas cimenteiras, eram equipadas com fornos de via seca contendo pré-aquecedores e pré-calcinadores, além de sistemas de controle (MCTI, 2015 [b]). Em 2012 esse número era de 83 fábricas, das quais 53 eram integradas, utilizando forno de produção de clínquer, e 30 eram apenas moagens, utilizando o clínquer previamente pronto (MCTI, 2015 [b]).

A produção de cimento brasileira, em 2016, foi de 57 milhões de toneladas, sendo sua capacidade instalada de 100 milhões de toneladas e o consumo aparente de cimento de 57 milhões de toneladas (SNIC, 2017 [b]). No *ranking* mundial de produção de cimento, o Brasil, em 2016, caiu da posição de 6^a posição para 9^a, com participação de 1,4% no total produzido (MME, 2017).

As emissões de CO₂ da produção de cimento em 2010, no Brasil, foram estimadas em 39.119 Gigagramas de CO₂, com aumento de 48,7% em relação às emissões de 2005. Na produção de cal, no mesmo ano, as emissões de CO₂ alcançaram a estimativa de 6.403 Gg de CO₂, com aumento de 11% em relação às emissões de 2005 (MCTI, 2015 [b]).

Em 2013, a produção de cimento no Brasil foi de 48% na região Sudeste, 20% na região Nordeste, 15% na região Sul, 12% na região Centro-Oeste e 5% na região Norte (SNIC, 2013). Na Tabela 1 tem-se um quadro com a produção e as vendas de cimento, por grupo industrial para os anos de 2012 e 2013.

Tabela 1: Produção e despacho de cimento por grupo industrial para os anos de 2012 e 2013 (em 1.000 toneladas).

Grupo industrial	Produção		Despacho	
	2012	2013	2012	2013
Votorantim	24.360	25.163	24.208	25.269
Inter cement	12.636	12.974	12.473	12.483
João Santos	7.161	7.105	7.084	7.111
Lafarge	6.061	5.908	6.080	6.060
Ciplan	2.414	2.724	2.418	2.782
Itambé	1.678	1.790	1.675	1.790
Outros (*)	14.499	14.497	14.435	14.467
Total Brasil	68.809	70.161	68.373	69.962

(*) Dados estimados.

Fonte: SNIC (2013).

A produção de cimento é um processo intensivo em energia e matérias-primas e resulta na geração de dióxido de carbono (CO₂) tanto do consumo de energia empregado em sua fabricação como do processo químico. Durante o processo de produção do cimento, o carbonato de cálcio (CaCO₃) é aquecido em um forno de cimento a uma faixa de temperatura de aproximadamente 700 a 1.000 graus Celsius para formar cal (óxido de cálcio ou CaO) e CO₂ num processo conhecido como calcinação. Durante a calcinação, cada molécula de calcário (CaCO₃), aquecida no forno de clínquer, forma uma molécula de cal (CaO) e uma molécula de CO₂, conforme Equação 2 (EPA, 2017).

(Eq. 2)

Em seguida, a cal é combinada com materiais contendo sílica para produzir o clínquer. A quantidade de CO₂ emitida durante a produção de cimento é diretamente proporcional ao teor de cal do clínquer. O clínquer é então deixado arrefecer, misturado com uma pequena quantidade de gesso e outros materiais, como a escória, e utilizado para fazer o cimento *Portland* (EPA, 2017).

As emissões de CO₂ na produção de cimento representam, aproximadamente, 5% das emissões globais de CO₂ (SWEENEY; WEYANT, 2008).

A indústria de cimento emite, tanto no uso de energia como no processo de calcinação

em forno, cerca de 0,9 toneladas de CO₂ por tonelada de cimento *Portland* produzido (HASANBEIGI *et al.*, 2010 [a]).

As emissões específicas de CO₂ da produção de cimento dependem do *mix* de combustível e da relação entre clínquer e cimento que varia de 0,5 a 0,95 (HENDRIKS *et al.*, 2004). No mundo, o carvão continua a ser o combustível mais comum utilizado para gerar o calor necessário no forno. O carvão é também o mais poluente emissor de CO₂, liberando cerca de 95 kg de CO₂ por GJ de energia (SWEENEY; WEYANT, 2008).

3.2.1.2. Indústria Siderúrgica

Dados de 2015 mostram que o parque produtor de aço brasileiro era composto por 29 usinas administradas por 11 grupos empresariais. Sua capacidade instalada era de 48,9 milhões de toneladas/ano de aço bruto e sua produção de 33 milhões de toneladas. O consumo aparente era de 21,3 milhões de toneladas. O saldo comercial era de US\$ 3,5 bilhões, sendo o 11º exportador mundial de aço (exportações diretas), exportando para mais de 100 países (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016).

Em 2015, operando com 68% da sua capacidade instalada, o Brasil ficou em 8º lugar no *ranking* mundial de produtores de aço bruto (MME, 2017).

Na Tabela 2 tem-se a lista da quantidade de aço bruto produzida por grupo empresarial no país no período de 2011 a 2015.

Tabela 2: Produção de aço bruto brasileira, no período de 2011 a 2015, por grupo empresarial.

Empresas	2011	2012	2013	2014	2015
Aperam	739	728	739	745	709
ArcelorMittal Aços Longos	3.538	3.423	3.510	3.273	3.146
ArcelorMittal Tubarão	5.405	4.390	4.430	5.368	6.843
CSA	3.147	3.510	3.721	4.134	4.235
CSN	4.874	4.847	4.457	4.458	4.255
Gerdau	8.777	8.181	8.063	7.458	7.031
Sinobras	243	319	314	331	351
Usiminas	6.698	7.157	6.859	6.054	5.007
Vallourec	537	511	421	404	260
VSF	39	192	304	352	176
Villares Metals	137	121	141	140	119
Votorantim Siderurgia	1.086	1.145	1.204	1.180	1.124
Total	35.220	34.524	34.163	33.897	33.256

Notas: Corresponde à produção de aço em lingotes + produtos de lingotamento contínuo + aço para fundição

Fonte: MME (2016).

Em 2015, a produção brasileira de ferro-gusa foi de 32,1 milhões de toneladas, superior em 0,8% a de 2014, cujo valor foi de 32 milhões. As usinas integradas representaram 84,6% desse total. A matriz energética da indústria do aço, em 2013²², era composta por carvão mineral/coque (74%) seguido pelos derivados de petróleo (14%), carvão vegetal (7%) e energia elétrica (5%). Da energia elétrica consumida pelo setor, 48% é de geração própria e 52% comprada (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).

A produção brasileira de aço bruto no acumulado do primeiro trimestre de 2017 foi de 8,2 milhões de toneladas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2017).

²² Os dados referentes à matriz energética, fonte de energia elétrica e emissões referem-se às seguintes empresas associadas e suas respectivas unidades industriais produtoras de aço: Aperam, ArcelorMittal Brasil, Gerdau, Sinobras, ThyssenKrupp CSA, Usiminas, Vallourec Tubos do Brasil, Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil - VSB, Villares Metals e Votorantim Siderurgia. O período-base das informações é o ano de 2013 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).

Para se produzir o aço há, basicamente, duas rotas tecnológicas com algumas possíveis variações ou combinações entre si (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014):

- Integrada: composto pelas fases de preparo da carga, redução, refino, lingotamento e laminação;
- Semi-integrada: composto pelas fases de refino, lingotamento e laminação.

A diferença entre as duas rotas é, essencialmente, a matéria-prima empregada. Na rota integrada há predomínio do minério de ferro (junto a uma pequena quantidade de sucata de aço). Já nas usinas semi-integradas (fornos elétricos a arco - EAF) utiliza-se, principalmente, a sucata. O processo siderúrgico compõe-se, resumidamente, de 5 grandes etapas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014):

- Preparo do minério e do carvão: parte do pó de minério de ferro passa por um processo de aglomeração, via sinterização ou pelletização. Isto resulta, respectivamente, no sinter e nas pelotas. Os dois materiais, junto ao minério de ferro de maior granulometria, são utilizados na carga do alto-forno. O carvão mineral possui compostos voláteis em sua composição que são indesejáveis ao processo, assim, o carvão é aquecido em fornos (coquerias) para a volatilização destes materiais, transformando-se em coque;
- Redução do minério Fe: nesta etapa ocorre a remoção do O_2 contido nos óxidos do minério, sendo o agente redutor o coque ou o carvão vegetal. Esta fase ocorre nos altos-fornos (a coque ou carvão vegetal) resultando no ferro-gusa (liga de Fe e C). O ferro-gusa ainda possui certas impurezas, como o fósforo, o enxofre e a sílica;
- Refino: nesta etapa há a redução do teor de carbono e das impurezas do ferro-gusa até que sejam atingidos os valores padronizados para os diferentes tipos de aço. A transformação do ferro-gusa em aço ocorre nas aciarias elétricas ou LD;
- Lingotamento: o aço das aciarias escorre nas lingoteiras e solidifica-se sob a forma de lingotes ou é cortado sob a forma de placas, blocos ou tarugos nas máquinas de lingotamento contínuo;
- Laminação: os produtos do lingotamento convencional ou contínuo são transformados mecanicamente pela laminação, forjamento e outros processos mecânicos, em diversos produtos (fios, barras, chapas, vergalhões, perfis, folhas, etc.).

Na Figura 5 tem-se um esquema ilustrando o processo de produção do aço.

Figura 5: Esquema ilustrado do processo de produção do aço.
Fonte: Instituto Aço Brasil (2014).

Na Tabela 3, tem-se a composição do parque produtor de aço no Brasil.

Tabela 3: Parque produtor de aço no Brasil (tipo de usinas e produtos) por fabricante.

Tipo	Produto	Usinas Siderúrgicas
Usinas Integradas	Laminados planos	Aperam South America (MG), ArcelorMittal Tubarão (ES), CSN (RJ), ThyssenKrupp CSA Siderúrgica do Atlântico (RJ), Usiminas (Ipatinga-MG e Cubatão-SP)
	Laminados longos	ArcelorMittal Aços Longos (Monvelade-MG, Juiz de Fora-MG), Gerdau Aços Longos (Barão de Cocais-MG, Divinópolis-MG), Sinobrás (Marabá-PA), Vallourec (Barreiro-MG), VSB (Jeceaba-MG)
	Laminados planos e longos	Gerdau Açominas (Ouro Branco-MG)
Usinas Semi-integradas	Laminados longos	Gerdau Aços Especiais (Pindamonhangaba-SP, Mogi das Cruzes-SP, Piratini-RS), Votorantim Siderurgia (Barra Mansa-RJ, Resende-RJ), ArcelorMittal Aços Longos (Piracicaba-SP, Cariacica-ES), Gerdau Aços Longos (Açonorte-PE, Cearense-CE, Cosigua-RJ, Usiba-BA, Guafra-PR, São Paulo-SP, Riograndense-RS), Villares Metals (SP).

Fonte: Instituto Aço Brasil (2014).

A produção de ferro e aço é um processo de etapas múltiplas que gera emissões de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), relacionadas ao processo, à medida que as matérias-primas são refinadas em ferro e depois transformadas em aço bruto (EPA, 2017).

Além dos processos de produção acima mencionados, o CO₂ também é gerado em usinas siderúrgicas através do consumo de subprodutos do processo (por exemplo, gás de alto forno, gás de forno de coque) usado para vários fins, incluindo aquecimento, recozimento e geração de eletricidade. Em geral, as emissões de CO₂ são geradas nos processos de produção através da redução e consumo de vários insumos contendo carbono (como minério, sucata e subprodutos de coque). Além disso, as emissões fugitivas de CH₄ também podem ser geradas a partir desses processos, assim como pela sinterização e produção direta de ferro e *pellets* (EPA, 2017).

A maioria das emissões de CO₂ do processo de produção de ferro e aço provém do uso de coque na produção de ferro gusa e do consumo de outros subprodutos do processo, com menores quantidades emitidas pelo uso de fluxo e pela remoção de carbono do ferro-gusa usado para produzir aço (EPA, 2017).

No Brasil, na produção de ferro-gusa e aço pelas usinas integradas e semi-integradas utiliza-se, como redutores, os combustíveis fósseis: coque de petróleo, carvão vapor,

carvão metalúrgico e coque de carvão mineral. A produção de ferro-gusa por usinas independentes utiliza, quase totalmente, carvão vegetal. Para a produção de ferroligas no país, também se utiliza como combustível, majoritariamente, o carvão vegetal (MCTI, 2016).

Conforme o Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais – SINDIFER, no ano de 2015, a produção de gusa da siderurgia usando o coque como redutor foi de 25,6 milhões de toneladas. Usando carvão vegetal foi de 6,5 milhões de toneladas, sendo, destes, 2,2 milhões de toneladas produzidas pelas usinas integradas e 4,3 milhões de toneladas oriundas dos produtores independentes (MME, 2017).

As emissões de CO₂, derivadas do uso de combustíveis fósseis para a produção de ferro-gusa e aço, em 2010, foram de 39.568 Gigagramas (ou 39.568.000 toneladas) (MCTI, 2016).

Na Tabela 4 encontram-se as emissões absolutas e específicas de GEE na produção de aço brasileira, para o período de 2011 a 2013 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).

Tabela 4: Emissões absolutas e específicas de GEE para a produção de aço no Brasil, no período de 2011 a 2013.

Emissões de Gases de Efeito Estufa	2011	2012	2013
Emissão absoluta (10 ³ tCO ₂)	49.472	49.779	50.763
Emissão específica (tCO ₂ /t aço bruto)	1,7	1,7	1,7

Fonte: Instituto Aço Brasil (2014).

3.3. CONCEITOS METODOLÓGICOS

Este capítulo traz a definição de conceitos metodológicos aplicados no presente trabalho (Seção 3.3.1) e alguns estudos existentes, na área, sobre meta-análise e harmonização (Seção 3.3.2).

3.3.1. Revisão sistemática, meta-análise e harmonização

Segundo Cook, Sackett e Spitzer (1995) “revisão sistemática equivale à visão global”, sendo a aplicação de estratégias científicas que limitam o viés para uma análise sistemática, avaliação crítica e síntese de todos os estudos relevantes sobre um tema específico. Já “meta-análise equivale à visão global quantitativa”, sendo a revisão sistemática que utiliza métodos estatísticos para combinar e resumir os resultados de vários estudos de um mesmo assunto.

De acordo com Miranda (2012), a revisão sistemática da literatura deve ser a fonte preferencial de dados para uma meta-análise.

As revisões sistemáticas são investigações científicas com métodos planejados que usam estudos existentes como objetos e sintetizam os resultados de vários estudos. Este processo exige que as decisões sejam explicitadas, conduzindo a questão, baseada em um protocolo reproduzível e em um escopo abrangente (IMPERIALE, 1999). Uma revisão sistemática é uma avaliação transparente e imparcial de informações disponíveis e, ao ser publicada, deve relatar os detalhes da condução da revisão como se poderia relatar os detalhes de um projeto de pesquisa primária, incluindo a descrição dos métodos, recolhimento de dados e a realização da análise (que não precisa ser necessariamente a meta-análise) (NEELY *et al.*, 2010).

Após a conclusão da revisão sistemática pode ser realizada a meta-análise e os resultados, então, são apresentados (NEELY *et al.*, 2010).

A meta-análise fornece um quadro para a síntese da pesquisa, aumenta a potência e precisão, fornece uma estimativa global e identifica uma maior variabilidade entre os resultados de estudos (heterogeneidade). Meta-análises também são conhecidas como revisões sistemáticas quantitativas (IMPERIALE, 1999).

Como resultado da meta-análise tem-se um resumo de evidências capaz de mostrar tendências centrais, variações e pistas para se tentar elucidar diferenças entre diversos

estudos (MIRANDA, 2012). É possível, também, considerar certas questões que não foram abordadas nos estudos originais (LITTELL; CORCORAN; PILLAI, 2008). Meta-análise estende-se para além de uma avaliação padrão da literatura, pela análise e síntese dos resultados de múltiplos estudos de uma forma estatística (STANLEY, 2001).

A revisão sistemática empregada para a meta-análise permite ao pesquisador considerar diversos estudos e não somente os mais acessíveis, resultando em uma análise mais objetiva do resultado (SAMPAIO e MANCINI, 2007), bem como a oportunidade de resolver controvérsias decorrentes de reivindicações conflitantes (DEEKS; HIGGS; ALTMAN, 2008).

Na Figura 6 tem-se um esquema simplificado das etapas de uma meta-análise. O esquema foi elaborado por Miranda (2012), baseando-se, segundo a autora, em trabalhos de Sampaio e Mancini (2007); Littell, Corcoran e Pillai (2008) e Neely *et al.* (2010).

Figura 6: Etapas de uma meta-análise.
Fonte: Miranda (2012).

Ao longo das últimas duas décadas, tem havido centenas de meta-análises nas ciências médicas e sociais (STANLEY, 2001). No campo da saúde há diversos protocolos para revisões sistemáticas e meta-análises, como a Declaração PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses*). Ela se concentra em maneiras nas quais os autores podem garantir a comunicação transparente e completa de revisões sistemáticas e meta-análises. Destaca-se, também na área de saúde, o trabalho de Gail Neely (2010), denominado “*A practical guide to understanding systematic reviews and meta-analyses*”.

Harmonização, por sua vez, refere-se a todos os esforços que padronizam as entradas e saídas de pesquisas comparativas. A harmonização é um termo genérico para procedimentos utilizados predominantemente nas estatísticas oficiais destinadas a alcançar ou a melhorar a comparabilidade das diferentes investigações e medidas coletadas (GRANDA e BLASCZYK, 2010). Segundo Heath e Mann (2012) a harmonização é uma abordagem meta-analítica.

O termo harmonização está relacionado à padronização, podendo ser aplicado a qualquer parte da pesquisa, como por exemplo: no desenho do estudo, na escolha de indicadores, na pergunta de pesquisa, na redação, na tradução, na adaptação, no projeto, no questionário, na amostragem, no trabalho de campo, nos dados de edição ou de documentação. A necessidade de harmonizar surge para todas as pesquisas comparativas, sobretudo se o objetivo for combinar os dados em um único conjunto integrado de dados (GRANDA e BLASCZYK, 2010). Seu objetivo, segundo Granda e Blasczyk (2010) é conseguir ou melhorar, a compatibilidade dos dados coletados a partir de dados semelhantes, mas com fontes independentes, a fim de permitir o compartilhamento da informação.

A harmonização dos dados pode ser alcançada através de diferentes abordagens, cada uma com suas próprias deficiências e vantagens (GRANDA e BLASCZYK, 2010). As abordagens da harmonização podem ser caracterizadas como sendo: (a) prospectiva ou retrospectiva, e (b) rigorosa ou flexível (DOIRON *et al.*, 2012).

Harmonização retrospectiva, que será utilizada neste estudo, refere-se aos muitos procedimentos que visam atingir a comparabilidade dos dados coletados anteriormente. Ela é um passo fundamental na realização de uma meta-análise cientificamente rigorosa (GRIFFITH *et al.*, 2015).

Dado o potencial de fazer uso de dados previamente recolhidos, a principal vantagem da harmonização retrospectiva é que pode ser conseguida com o tempo e custos relativamente modestos, sem a criação de novas e complexas infraestruturas de investigação (DOIRON *et al.*, 2012).

Os principais passos para a harmonização incluem: (a) definir a questão da pesquisa e selecionar os estudos elegíveis, (b) avaliar a possibilidade de harmonização, (c) transformar os dados específicos de estudo para um formato comum para gerar o conjunto

de dados harmonizados e (d) avaliar o sucesso do processo de harmonização (DOIRON *et al.*, 2012).

Segundo Doiron *et al.* (2013) as vantagens de harmonizar e de reagrupar os bancos de dados de pesquisa são numerosos. A integração de dados harmonizados de diferentes populações permite alcançar tamanhos de amostra dificilmente obtidos com estudos individuais (HAMILTON *et al.*, 2011), melhora a generalização dos resultados (HAMILTON *et al.*, 2011), auxilia a garantir a validade da investigação comparativa (SERRA-MAJEM, 2003), incentiva o uso secundário mais eficiente dos dados existentes (SANSONE *et al.*, 2012) e oferece oportunidades de pesquisa multicêntrica colaborativa (BUDIN-LJOSNE *et al.*, 2013).

3.3.2. Estudos envolvendo meta-análises e harmonizações

Com relação a estudos envolvendo meta-análises combinadas à harmonização na área de emissões (e mitigação) de GEE e energia, eles são frequentes nos trabalhos de Heath (BURKHARDT; HEATH; COHEN, 2012; DOLAN e HEATH, 2012; WARNER e HEATH, 2012), que participou do projeto denominado “Projeto de Harmonização de Análise de Ciclo de Vida”, financiado pelo Laboratório de Eficiência Energética e Energia Renovável do Ministério de Energia dos Estados Unidos. Os resultados da revisão sistemática do projeto foram publicados no “Relatório Especial sobre Fontes Renováveis de Energia e Mitigação das Alterações Climáticas” do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2011).

Segundo Heath e Mann (2012), o projeto desenvolveu um procedimento de meta-análise e harmonização, que ajustou as estimativas publicadas em trabalhos anteriores para aquelas baseadas em um conjunto mais consistente de métodos e premissas. Isto foi feito em decorrência dos GEE do ciclo de vida de tecnologias de geração de energia elétrica diferirem “em métodos e pressupostos” entre si, o que dificultava a comparação direta dos resultados.

Foram apresentados seis artigos, da primeira fase do projeto, em uma edição especial sobre Meta-Análise de ACVs (Análises do Ciclo de Vida), do Jornal de Ecologia Industrial, tratando de temas específicos como: carvão (WHITAKER *et al.*, 2012),

energia solar por meio de concentradores (BURKHARDT; HEATH; COHEN, 2012), energia eólica (DOLAN e HEATH, 2012), energia solar por meio de módulos fotovoltaicos (HSU *et al.*, 2012) e de película fina (KIM *et al.*, 2012) e, energia nuclear (WARNER e HEATH, 2012).

Cada artigo, segundo Heath e Mann (2012), tomou uma abordagem um pouco diferente, o que demonstra, de acordo com os autores, a flexibilidade da abordagem de harmonização.

Outro estudo realizado por Heat *et al.* (2014) realizou uma harmonização da literatura, seguida de meta-análise, para estabelecer comparações entre estimativas de emissões de GEE do ciclo de vida em atividades de produção e uso de gás de xisto, gás natural e carvão, para a geração elétrica. O objetivo do estudo foi o fornecimento de informações de qual destas fontes de combustível, para a geração de energia, possuía menores emissões de GEE em seu ciclo de vida.

O processo de harmonização normalizou dados da produção e utilização de gás de xisto, tornando os dados comparáveis antes de iniciar a meta-análise de cerca de 100 ACVs. Outras harmonizações, de acordo com Heath *et al.* (2014) também foram realizadas, em geral relacionadas à eficiência térmica, ajustes relacionados ao potencial de aquecimento global e harmonização da perda de transmissão e distribuição de energia.

Kuik, Brander e Tol (2009) realizaram uma meta-análise de informações sobre o custo marginal de abatimento de 62 estudos que avaliaram os impactos econômicos do cumprimento de metas de estabilização de longo prazo de GEE na atmosfera. A meta-análise foi usada para examinar se as estimativas modeladas dos custos dependiam de alguns pressupostos de modelagem e das características destes modelos. As variáveis incluídas foram: a meta de estabilização, as linhas de base das emissões, pressupostos de modelo e de política e, também, o fórum de modelagem no qual o estudo foi desenvolvido.

Para tornar os dados comparáveis, os resultados dos diferentes estudos utilizados no trabalho foram padronizados de várias metas de estabilização para uma métrica comum. As métricas mais utilizadas foram o forçamento radioativo (W/m^2), a concentração de CO_2 , as concentrações equivalentes de outros GEE e a temperatura média global ($^{\circ}C$). Além dos 26 modelos provenientes dos fóruns, foram coletadas 62 observações do custo de abatimento para os anos 2025 e 2050. As observações foram

normalizadas, pois eram expressas em diferentes dimensões. Para converter todos os preços em um ano comum foram utilizados índices de preços ao consumidor (IPC), da OCDE. Para converter todas as moedas em uma moeda comum (Euro) foram utilizadas as taxas de câmbio e, para converter todas as dimensões físicas a uma dimensão física comum (CO₂e) foram usados os pesos moleculares (KUIK; BRANDER; TOL, 2009).

O valor médio do custo de abatimento em todas as observações utilizáveis foi de 24,8 €/tCO₂e em 2025 e de 55,8, em 2050. A conclusão do estudo foi a de que as estimativas de custo dos estudos são sensíveis à rigidez do objetivo de estabilização, ao cenário de referência das emissões assumidas, à forma como o perfil temporal das emissões é determinado no modelo, à escolha da variável de controle (CO₂ *versus* multigases), ao número de regiões e fontes de energia no modelo e, em menor grau, ao “grau de maturidade” do fórum científico no qual o estudo foi desenvolvido (KUIK; BRANDER; TOL, 2009).

4. METODOLOGIA

Na literatura há diversos estudos MACC com diversas tecnologias de baixo carbono, diferentes potenciais de redução de emissão, custos marginais de abatimento, moedas e períodos de tempo. Logo, para realizar uma meta-análise, os dados foram coletados por meio de uma revisão sistemática da literatura e foram harmonizados, por meio de uma metodologia de adaptação, para que pudessem ser comparados entre si, atualizados e aplicáveis na construção das MACC para qualquer jurisdição.

O procedimento desenvolvido para validação da metodologia foi a comparação de duas publicações (WORRELL *et al.*, 2000; HASANBEIGI *et al.*, 2010 [b]) de anos e países diferentes, nas quais um autor cita o outro. As tecnologias de baixo carbono utilizadas em ambos os estudos foram as mesmas.

Os dados coletados da literatura foram reunidos numa base dados, utilizando-se o *software Access®* (versão 2013) no qual foram implementados os cálculos para sua harmonização. Esta ferramenta foi chamada de *re-MACC*.

No estudo de caso para o Brasil, foram harmonizadas um total de 178 tecnologias de baixo carbono, sendo 106 pertencentes ao subsetor de cimento e 72 ao subsetor de siderurgia.

Após a harmonização foi gerada uma MACC única para os subsetores de cimento e siderurgia brasileiros com as 20 tecnologias de menor custo marginal de abatimento.

Os procedimentos utilizados para a revisão sistemática e para a meta-análise foram baseados no trabalho de Neely *et al.* (2010) e na Declaração PRISMA, descrita conforme Liberati *et al.* (2009).

A harmonização (do tipo retrospectiva) utilizada neste estudo não seguiu nenhum protocolo existente, uma vez que procedimentos de harmonização são desenvolvidos de acordo com cada caso e objetivo de pesquisa.

Nos itens 4.1 a 4.5 tem-se a descrição sobre as etapas de meta-análise e harmonização (retrospectiva) desenvolvidas no estudo.

4.1. META-ANÁLISE: ETAPA 1 – DEFINIÇÃO DO OBJETIVO DA REVISÃO SISTEMÁTICA

De acordo com Neely *et al.* (2010) o primeiro passo de uma revisão sistemática é a definição do objetivo.

Tendo-se claro o objetivo do trabalho (vide seção 2 - Objetivos) a próxima etapa é o desenvolvimento de um protocolo.

4.2. META-ANÁLISE: ETAPA 2 – DESENVOLVIMENTO DO PROTOCOLO

Um protocolo é importante porque especifica previamente os métodos da revisão sistemática. Ele especifica os resultados de interesse, como os revisores extrairão as informações destes resultados e os métodos que os avaliadores poderão usar para resumir quantitativamente os dados. O protocolo pode ser modificado durante a pesquisa e os leitores não devem considerar essas modificações inapropriadas (LIBERATI *et al.*, 2009).

Assim, o protocolo inicial para as pesquisas, consistiu na busca por artigos de estudos contendo as MACC.

Para manter o rigor dos resultados retornados, foram escolhidas fontes de pesquisa conceituadas academicamente, como o *Scopus* e o *Web of Science*.

A palavra-chave utilizada nestas bases de dados foi “*marginal abatement cost*”.

Além das buscas utilizando tais bases de dados e palavras-chave, foram pesquisados autores citados nos artigos encontrados.

O resultado da busca pelos artigos está apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Número retornado de artigos conforme sítio de pesquisa

Palavras-chave	Número de Resultados (*)	
	SCOPUS	Web of Science
<i>marginal abatement cost</i>	763	606

(*) Conforme pesquisa realizada em 13 de dezembro de 2017, às 2h41.

Após o mapeamento do universo de dados utilizando o protocolo desenvolvido, criaram-se critérios para eleger quais artigos deveriam ser selecionados, conforme descrito na sequência.

4.3. META-ANÁLISE: ETAPA 3 – CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE

O conhecimento dos critérios de elegibilidade é essencial para avaliar a validade, aplicabilidade e abrangência de uma revisão. Assim, os analistas devem especificar inequivocamente os critérios de elegibilidade utilizados na revisão. Os critérios de elegibilidade cuidadosamente definidos informam várias etapas da metodologia de revisão. Eles influenciam o desenvolvimento da estratégia de busca e servem para garantir que os estudos sejam selecionados de forma sistemática e imparcial (LIBERATI *et al.*, 2009).

Logo, como critério inicial de elegibilidade, os artigos selecionados deveriam apresentar as tecnologias de baixo carbono para o setor industrial. Para cada tecnologia, os artigos deveriam apresentar, numa MACC, o potencial de redução de emissões de GEE (em unidade de massa de CO₂e) e os custos da tonelada de CO₂e evitada (em unidade monetária dividida pela massa de CO₂e).

Além disso, cada artigo deveria apresentar o período de cada estudo (e ano de projeção, se fosse o caso), a unidade política do estudo, bem como os dados da referência propriamente dita (título e ano da publicação, autor (es), *document object identifier* (DOI) e/ou endereço eletrônico).

Assim, utilizando tal critério, foram eleitos 193 artigos. Entretanto foi necessário refinar os critérios de elegibilidade.

Com esse novo critério, os artigos que possuíam apenas as MACC (o gráfico) mas não discriminavam, explicitamente, os valores correspondentes ao potencial de redução de emissões e os custos de abatimento de cada tecnologia foram desprezados. Tentou-se inferir o potencial de redução e os custos medindo-se o gráfico da MACC com a utilização de *softwares* gráficos, porém estes artigos foram descartados (conforme próximo parágrafo).

Estudos feitos genericamente para o setor industrial, sem especificar a qual subsetor industrial pertenciam também foram descartados, pois citavam as tecnologias de modo geral, sendo impossível saber se pertenciam ao subsetor de cimento, siderurgia ou outro. Artigos com tecnologias descritas sem o detalhamento necessário para classificá-las conforme sua fonte de emissão (Tipo C ou E, vide seção 4.5.1) também foram descartados.

Assim, após aplicação dos critérios de elegibilidade foram eleitos 7 artigos, cuja autoria é a seguinte: Hasanbeigi *et al.* (2010 [b]), Sweeney *et al.* (2008), Wang *et al.* (2007), Wetzelaer *et al.* (2007), Worrell *et al.* (2001), Hasanbeigi *et al.* (2010 [c]) e Worrell *et al.* (2000).

Após serem selecionados os artigos, seus dados foram extraídos e armazenados no *re-MACC*, conforme descrito adiante.

4.4. META-ANÁLISE: ETAPA 4 – PROCESSO DE EXTRAÇÃO E ARMAZENAMENTO DOS DADOS

Dos 7 artigos selecionados na etapa anterior foram extraídas 178 tecnologias de baixo carbono. Elas foram armazenadas no *Access®* (*re-MACC*) para serem harmonizadas posteriormente.

O *Access®* foi escolhido para inserção e harmonização dos dados por ser capaz de apresentar os resultados em planilhas, sendo compatível com o formato necessário para se criar as *MACC*. Ele também permite apontar informações deletadas da base de dados, reduzindo as chances de eles serem apagados acidentalmente. Além disso, ele facilita a organização e o manuseio de um grande volume de informações e, permite que certos dados sejam digitados apenas uma única vez, permitindo ao usuário escolhê-los de uma lista, sem necessitar digitar novamente cada valor.

O *Access®* permite, também, a realização automática de cálculos matemáticos e sua base de dados é facilmente expansível, pois permite a atualização e a integração de novos valores a qualquer momento. Entretanto, para que os cálculos sejam realizados automaticamente, além de inserir as equações de interesse, é necessário criar relações entre os dados, conforme será explicado a seguir.

4.4.1. Criando relações entre as tabelas no Access® (re-MACC)

O Microsoft® Access® é um sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD). Um SGBD é um *software* projetado para auxílio na manutenção e na utilização de grandes conjuntos de dados (RAMAKRISHNAN e GEHRKE, 2008).

O Access® utiliza a linguagem SQL para acesso aos seus dados e o Modelo Relacional (MR) para gerenciar seu banco de dados (GILLENSON, 2006).

Um banco de dados relacional tem várias **tabelas** relacionadas e, quando bem projetado, cada tabela armazena dados sobre um assunto. Tabelas são objetos muito importantes em um banco de dados, já que elas mantêm todos os dados. Uma tabela possui **registros** (linhas) e **campos** (colunas). Os campos possuem diferentes tipos de dados (texto, números, datas, *hiperlinks*) (MICROSOFT, 200_[a]).

Na Figura 7 tem-se um exemplo genérico de tabela do Access® e seus componentes.

Identif	Empresa	Sobrenome	Nome
1	Empresa A	Bedecs	Anna
2	Empresa B	Gratacos So	Antonio
3	Empresa C	Axen	Thomas

(1) Registro: contém dados específicos, como informações sobre um determinado funcionário ou um produto; (2) Campo: contém dados sobre um aspecto do assunto tabela, como nome ou endereço de e-mail; (3) Valor de campo: cada registro tem um valor de campo.

Figura 7: Componentes de uma tabela do Access®.

Fonte: Microsoft (200_[a]).

Para remover a redundância dos dados (dados duplicados) é necessário dividir os dados em várias tabelas baseadas em tópicos, para que cada fato seja mostrado uma única vez. Em seguida deve-se fornecer ao Access® os meios pelos quais as informações divididas serão novamente reunidas. Isto é feito colocando-se campos em comum nas tabelas que sejam relacionadas (MICROSOFT, 200_[c]).

O Access® denomina os relacionamentos entre as tabelas de “Relações”. Deve-se primeiro compreender as relações entre as tabelas e depois especificar tais relações no banco de dados (MICROSOFT, 200_[c]). De acordo com Microsoft, (200_[a]), “uma relação é uma conexão lógica entre duas tabelas que têm um campo comum”.

Assim, os dados coletados na literatura foram reunidos no *re-MACC* e separados em tabelas baseadas em tópicos. Elas foram nomeadas de acordo com os dados aos quais faziam referência. Entre os campos das tabelas foram construídas as relações.

O tipo de relação utilizado entre todas as tabelas do *re-MACC* foi o de “um-para-muitos”²³.

Outro elemento importante do *Access*® são as “Consultas”. Uma consulta pode retornar informações de várias tabelas. Ela pode ser uma solicitação de resultados de dados do banco ou de ações envolvendo estes dados, ou ambos. Uma consulta pode fornecer a resposta à uma pergunta simples, realizar cálculos, combinar dados de tabelas distintas, adicionar, alterar ou excluir os dados de uma tabela (MICROSOFT, 200_[b]).

Após criar as relações entre as tabelas e definir o tipo de relação entre elas, foi possível criar as Consultas. Nestas consultas foram adicionadas equações para que os cálculos (para harmonização dos dados) fossem realizados automaticamente. As equações utilizadas são apresentadas nos itens 4.5.2 e 4.5.3.

Na Figura 8 tem-se a interface do *Access*® (*re-MACC*) com o nome de todas as tabelas e consultas criadas. Há também o esquema das relações criadas, bem como seu tipo (um-para-muitos). O símbolo infinito representa o lado muitos da relação, enquanto que o símbolo 1, representa o lado um. A figura também está disponível no Apêndice 1

23 Há três tipos de “Relação” no *Access*® (um-para-um, um-para-muitos e muitos-para-muitos). No seguinte endereço é possível obter uma explicação detalhada: <<https://support.office.com/pt-br/article/Guia-para-rela%C3%A7%C3%B5es-de-tabelas-30446197-4f8e-457b-b992-2f6fb812b58f>> Acesso em 28 de dezembro de 2016.

Figura 8: Relações criadas entre as tabelas do *re-MACC* para as harmonizações. O menu, à esquerda, indica o nome de cada tabela e consulta.
 Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 6 traz a relação das tabelas e consultas criadas no *re-MACC*, bem como seu conteúdo. A tabela também está disponível no Apêndice 2.

Tabela 6: Listagem de tabelas e consultas criadas e seus respectivos conteúdos.

Lista de Tabelas
PAÍS: lista de países utilizados;
CPI: índices de preço ao consumidor, separados por ano;
MOEDA: lista de moedas utilizadas e suas respectivas taxas de câmbio;
FE_EL: fatores de emissão calculados, conforme ano e país;
FE_EL_BR: fatores de emissão da eletricidade para o Brasil, separados por ano;
FE_TPES: fatores de emissão relacionados à energia primária (calor), conforme ano e país;
FE_TPES_BR: fatores de emissão relacionados à energia primária (calor) para o Brasil, conforme ano;
ISIC_Rev_4: lista de atividades econômicas do ISIC, revisão número 4;
PERDAS_EL: perdas na transmissão de eletricidade, conforme ano e país;
PERDAS_EL_BR: perdas na transmissão de eletricidade no Brasil, conforme ano;
TECNOLOGIA: lista de tecnologias de baixo carbono, com seus respectivos potenciais de redução de emissão e custos marginais de abatimento, períodos de análise, moeda utilizada, fonte de dados, tipo de tecnologia, fatores de harmonização, etc.;
REFERÊNCIAS: lista de referências bibliográficas utilizadas (autores, DOI, ano de publicação, páginas, etc);
TIPO: tipo de tecnologia (C ou E);
PROD_FIS: indicador relacionado à produção industrial, conforme ano e país;
PROD_FIS_BR: indicador relacionado à produção industrial das indústrias brasileiras, conforme ano;
ANO: anos utilizados;
ANO_MOEDA: anos das moedas utilizadas.
Lista de Consultas
CUSTO: custos marginais de abatimento das tecnologias de baixo carbono, harmonizados para o Brasil, ano de 2014;
EMISSIONES-TIPO C: emissões harmonizadas das tecnologias de baixo carbono do tipo C para o Brasil no ano de 2014;
EMISSIONES-TIPO E: emissões harmonizadas das tecnologias de baixo carbono do tipo E para o Brasil no ano de 2014.

Fonte: Elaboração própria.

A tabela “Tecnologia” (Figura 9), é a tabela principal desenvolvida no *software*, pois nela é feito o cadastro das tecnologias coletadas. Ela está relacionada a todas as outras tabelas por campos em comum. Pode-se observar, também, um ícone representando uma

“chave” no topo da tabela. Ela representa uma chave-primária²⁴ e cada tabela pode possuir uma ou mais chaves. É possível ver, também, que alguns dos atributos foram grafados com um “FK” no início de seu nome. A sigla quer dizer *foreign key* (ou chave-estrangeira)²⁵.

Estes elementos são essenciais para o entendimento de como as relações do *re-MACC* foram construídas.

TECNOLOGIA
🔑 Código
Tecnologia
FK-FE-TPES
FK_ANO
FK_PAIS
Tipo
Emissões
Ano Final
Moeda
Ano Moeda
Custo
FK-FE-TPES_BR
FK-PERDAS_EL
FK-PERDAS_EL_BR
FK-FE_EL
FK-FE_EL_BR
FK-PROD_FIS
FK-PROD_FIS_BR
Referência
ISIC
Observação

Figura 9: Tabela “Tecnologia” e sua lista de atributos. A figura mostra um ícone de chave (chave-primária) e a sigla “FK” (chave-estrangeira).

Fonte: Elaboração própria.

Em seguida estão descritos os processos de harmonização realizados no *re-MACC*. As equações utilizadas nas consultas são descritas mais adiante (itens 4.5.2 e 4.5.3).

²⁴ A chave-primária é um atributo ou grupo de atributos onde seus valores são únicos em todas as linhas da relação. Ela representa a característica de um conjunto de entidades identificando-as de maneira única (GILLENSON, 2006).

²⁵ A chave-estrangeira ocorre quando um atributo serve como chave-primária de uma relação e também aparece em outra relação. Em um banco de dados relacional chave-estrangeira é um conceito muito importante pois elas conectam as relações (GILLENSON, 2006).

4.5. META-ANÁLISE: ETAPA 5 – MÉTODOS DE ANÁLISE PLANEJADOS (HARMONIZAÇÃO)

Nesta etapa devem ser descritos os métodos de tratamento de dados e a combinação de resultados de estudos. Os dados extraídos dos estudos na revisão podem demandar uma transformação (processamento) antes da análise ou para apresentação dos resultados. Embora esse tratamento de dados possa facilitar as meta-análises, às vezes é necessário mesmo quando as meta-análises não são feitas (LIBERATI *et al.*, 2009).

Como mencionado anteriormente, os dados a serem harmonizados foram o potencial de redução de emissões (ou, simplesmente, “emissões”) e os custos marginais de abatimento (ou, “custos”) de cada tecnologia de baixo carbono coletada. O país escolhido para adaptação das MACC da literatura foi o Brasil, ano de 2014. A moeda foi o dólar (US\$) de 2014.

Deu-se o nome de “fatores de harmonização” às variáveis utilizadas para harmonizar dados referentes a um par de países, em anos diferentes.

Na seção a seguir tem-se a descrição dos procedimentos para preparação dos dados antes da harmonização.

4.5.1. Classificando as tecnologias coletadas

Cada tecnologia extraída dos artigos foi classificada de acordo com a “Classificação Industrial Internacional Padrão de Todas as Atividades Econômicas” ou, simplesmente, ISIC (*International Standard Industrial Classification of All Economic Activities*).

O intuito de utilizar um sistema de classificação internacional proposto pelas Nações Unidas é a adoção de uma linguagem comum que permite comparar análises internacionais de diferentes pesquisadores, além de facilitar a organização e classificação das informações, sendo possível definir cada atividade da economia e tornando comparáveis as informações pertinentes a tais atividades investigadas (BORSCHIVER; WONGTSCHOWSKI; ANTUNES, 2004).

A versão do ISIC utilizada foi a revisão número quatro ou, simplesmente “Rev. 4.0” (UNITED NATIONS, 2008).

A Figura 10 mostra um exemplo de classificação ISIC, com numeração hierarquizada em três níveis (divisão, grupo e classe) dentro da categoria de Indústrias de Transformação.

D - Indústrias de Transformação (CATEGORIA)
24 - Manufaturas de produtos químicos (DIVISÃO)
241 - Produção de químicos básicos (GRUPO)
2411 - Produção de químicos básicos exceto fertilizantes e compostos nitrogenados (CLASSE)

Figura 10: Exemplo de classificação ISIC.
Fonte: Borschiver; Wongtschowski; Antunes (2004).

Como os subsetores considerados no estudo foram a indústria de cimento e de siderurgia, as nomenclaturas utilizadas foram, segundo denominação do ISIC, as classes, “2394 - *Manufacture of cement, lime and plaster*” e “2410 - *Manufacture of basic iron and steel*”. Ambas pertencem à seção “C - *Manufacturing*”, do ISIC.

4.5.2. Harmonização do Potencial de Redução de Emissões

Além das tecnologias serem classificadas de acordo com o ISIC, outra classificação necessária e que incide diretamente na forma de harmonização do potencial de redução de emissões de cada tecnologia, é aquela relacionada à sua fonte de emissão.

Como mencionado anteriormente, o IPCC (2006) classifica as emissões em quatro setores: Energia; Processos Industriais e Uso de Produtos (IPPU); AFOLU e Resíduos.

De acordo com IPCC (2006) o setor de Energia, inclui todas as emissões de GEE decorrentes da combustão²⁶ e emissões fugitivas de combustíveis. As emissões dos usos não energéticos dos combustíveis geralmente são relatadas no IPPU. O setor de Energia inclui principalmente:

- Pesquisa e exploração de fontes de energia primária;

²⁶ O IPCC (2006, p. 1.8) define queima (combustão) do combustível como: “oxidação intencional de materiais dentro de um aparelho que é projetado para fornecer energia térmica ou mecânica a um processo ou para uso afastado do aparelho”.

- Conversão de fontes de energia primária em formas de energia utilizáveis, em refinarias e usinas;
- Transmissão e distribuição de combustíveis;
- Uso de combustíveis em aplicações fixas e móveis.

Quando as emissões forem procedentes da queima de combustíveis obtidas direta ou indiretamente da matéria-prima para um processo industrial, elas serão normalmente alocadas para a categoria de origem em que o processo ocorre, dentro da categoria IPPU. Entretanto, se há transporte dos combustíveis para a combustão em outra categoria de fonte, as emissões devem ser relatadas na parte apropriada das categorias de fonte do setor de Energia (IPCC, 2006).

Assim, entende-se que as emissões classificadas como IPPU são aquelas oriundas das reações químicas entre hidrocarbonetos ou da queima de combustíveis de processo²⁷ (obtidos direta ou indiretamente de substâncias que alimentam o processo).

Com relação ao setor de Energia, este compreende as emissões geradas da queima de combustíveis para uso energético (geração de calor, eletricidade, etc.) e emissões fugitivas. Dentro do setor de Energia, uma das categorias é a 1A1ai (Geração de Eletricidade), que compreende as emissões do uso de combustível para a produção de eletricidade.

Baseando-se nas considerações acima, propôs-se dividir as tecnologias de baixo carbono coletadas em dois grandes grupos: “Energia” ou “IPPU”.

Dentro destes grupos elas foram classificadas conforme denominações de “Tipo C” ou “Tipo E”, sendo aplicas à elas harmonizações diferentes, conforme segue:

- Tipo C: tecnologias cujas emissões são provenientes dos processos industriais (reações químicas ou queima de combustíveis de processo) ou do uso da energia (para produção de calor);

²⁷ Um exemplo de combustível de processo é o gás natural, para fabricação de amônia. Ele fornece tanto matéria-prima como combustível ao processo. Combustíveis de processo obtidos indiretamente são aqueles provenientes da utilização de subprodutos de processamento de matéria-prima ou uso de redutores. Exemplos são os gases obtidos a partir do craqueamento a vapor de matéria-prima de nafta para fabricação de etileno e gás de alto forno, a partir de altos fornos (IPCC, 2006).

- Tipo E: tecnologias cujas emissões são provenientes do uso da energia (elétrica) ou da geração e distribuição da eletricidade.

Na Figura 11 tem-se um esquema de como as tecnologias foram divididas.

Figura 11: Proposta de classificação do potencial de redução de emissões, de cada tecnologia em estudo, conforme sua fonte de emissão.

Fonte: Elaboração própria.

É importante mencionar que todos os tipos de classificação (C e E) são classificações hipotéticas, criadas no estudo, para diferenciar as tecnologias conforme o tipo de harmonização que foi desenvolvido para cada uma delas.

Além das harmonizações relacionadas aos Tipos C e E, foi realizada uma harmonização adicional em todas as tecnologias, independente do seu tipo. Ela está relacionada à produção industrial de cada país em determinado ano, sendo para tanto, utilizado um indicador econômico (dado em dólares).

Para justificar o uso deste indicador, pode-se utilizar a produção de cimento como exemplo. Conforme o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2013), a produção de cimento na China é cerca de 31 vezes maior que a do Brasil. Logo, o potencial de redução das emissões na produção de cimento chinesa será proporcionalmente superior ao potencial de redução de emissões brasileiro.

Nos itens 4.5.2.1 e 4.5.2.2 tem-se os cálculos utilizados para harmonizar cada tipo de tecnologia (C ou E). Os cálculos referentes à produção industrial estão embutidos nestas harmonizações.

4.5.2.1. Harmonização do Tipo C – Calor

Quando a tecnologia é do Tipo C (Calor), questões regionais relacionadas à matriz energética de cada país e, por conseguinte, seu Fator de Emissão (FE), devem ser levadas em conta. Além disso, foi considerada a produção industrial (P_{in}) de cada país em determinado ano.

Quando o artigo trazia o potencial de redução de emissões para períodos de tempo, estes foram anualizadas. Nesse caso, o ano considerado para os cálculos foi o primeiro do período.

O FE, dado em $tCO_2/TPES$ ²⁸ (com o TPES dado em Terajoule (TJ)), foi obtido segundo IEA (2017 [a]) cujos dados são relacionados por país e ano correspondente.

O valor do P_{in} (“*Industrial Production, constant US\$*”)²⁹ foi obtido do Banco Mundial (2018 [b]).

Para transformar as emissões de um dado país e ano tornando-as equivalentes às emissões do Brasil, em 2014, foi utilizada a Equação 3.

$$E_{(br)} = \frac{FE_{(br)}}{FE_{(a)}} \cdot \frac{P_{in}(br)}{P_{in}(a)} \cdot E_{(a)}$$

(Eq. 3)

Onde:

$E_{(br)}$ = emissões evitadas no Brasil, em 2014 (MtCO₂e/ano);

$E_{(a)}$ = emissões evitadas no país x, no ano y (MtCO₂e/ano);

$FE_{(br)}$ = fator de emissão do Brasil, em 2014 (tCO₂/TJ);

$FE_{(a)}$ = fator de emissão do país x, no ano y (tCO₂/TJ)

$P_{in}(br)$ = mudanças na produção industrial no Brasil, em 2014 (US\$);

$P_{in}(a)$ = mudanças na produção industrial no país x, no ano y (US\$);

x = país do artigo consultado;

y = ano base do artigo consultado.

²⁸ TPES é a sigla, em inglês, de *total primary energy supply*.

²⁹ Um indicador econômico que mede as mudanças na produção para o setor industrial da economia. O setor industrial inclui fabricação, mineração e serviços públicos. Os dados estão em US\$ constantes e não são ajustados sazonalmente. O ano base é 2005 (BANCO MUNDIAL [b], 2018).

A justificativa para o uso da Equação 3 é que o potencial de redução de emissões é influenciado pelo Fator de Emissão (CO_2/TPES). Este, por sua vez, é resultado da matriz energética característica de cada país, em um determinado ano.

O TPES (*total primary energy supply*) é a energia bruta utilizada em um dado país e pode ser obtido pela Equação 4 (IEA, 2013):

$$\text{TPES} = (\text{energia produzida}) + (\text{energia importada}) - (\text{energia exportada}) - (\text{estoques marítimos internacionais}) - (\text{estoques para aviação internacional}) + \text{ou} - (\text{variações nos estoques})$$

(Eq. 4)

Logo, a quantidade de emissões evitadas, para um mesmo processo produtivo, pode variar conforme o ano e o país considerados. Deste modo, a quantidade de emissões (assim como seu potencial de redução) em um país com FE menores, comparados a outros com elevados FE, será, proporcionalmente, menor. Países como o Brasil, que possuem processos industriais, baseados em matrizes energéticas consideradas “limpas” (essencialmente oriundas de hidrelétricas e biomassa) possuem menor potencial de redução de emissões, quando comparadas àqueles países cuja principal fonte energética são, por exemplo, termoeletricas abastecidas por combustíveis fósseis.

4.5.2.2. Harmonização do Tipo E – Eletricidade

Quando a tecnologia pertencer à Energia do Tipo E (Eletricidade) levou-se em conta, para cada país e ano, o fator de emissão relacionado à eletricidade (FE_{el}) e as perdas de transmissão e distribuição da energia elétrica (PE_{el}), até que ela chegue ao usuário final. Foi levada em conta, também, a produção industrial (P_{in}) para cada país e ano.

Quando o artigo trazia o potencial de redução de emissões para períodos de tempo, estes foram anualizadas. Nesse caso, o ano considerado para os cálculos foi o primeiro do período.

O FEel (gCO₂/kWh) foi obtido IEA (2017 [b]). O valor do Pel (“perdas de transmissão de energia elétrica e de distribuição - % de saída”)³⁰ foi retirado do site³¹ do Banco Mundial (2014). O valor do Pin (“*Industrial Production, constant US\$*”)³² foi obtido de Banco Mundial (2018 [b]).

Para cálculo das emissões relacionadas à eletricidade, utilizou-se a Equação 5.

$$E_{(br)} = \frac{FEel_{(br)}}{FEel_{(a)}} \cdot \frac{Pel_{(br)}}{Pel_{(a)}} \cdot \frac{Pin_{(br)}}{Pin_{(a)}} \cdot E_{(a)}$$

(Eq. 5)

Onde:

$E_{(br)}$ = emissões evitadas referentes ao Brasil, em 2014 (MtCO₂e/ano);

$E_{(a)}$ = emissões evitadas no país x, no ano y (MtCO₂e/ano);

$FEel_{(br)}$ = fator de emissão do Brasil, em 2014 (gCO₂/kWh);

$FEel_{(a)}$ = fator de emissão do país x, no ano y (gCO₂/kWh);

$Pel_{(br)}$ = perdas de energia elétrica no Brasil, em 2014 (% de saída);

$Pel_{(a)}$ = perdas de energia elétrica no país x, no ano y (% de saída);

$Pin_{(br)}$ = mudanças na produção industrial no Brasil, em 2014 (US\$);

$Pin_{(a)}$ = mudanças na produção industrial no país x, no ano y (US\$);

x = país do artigo consultado;

y = ano base do artigo consultado.

A justificativa para o uso da Equação 5 é que há diversos elementos que podem influenciar os fatores de emissão relacionados à eletricidade de um país. Um deles é a sua matriz energética, que influencia na conversão da energia primária em secundária, pois

³⁰ As perdas de transmissão e de distribuição de energia elétrica incluem perdas na transmissão entre fontes de alimentação e pontos de distribuição e, também, na distribuição aos consumidores, incluindo furtos. Ou, em outras palavras, são as perdas de energia elétrica para a produção de eletricidade, que é o número de GWh total gerado por usinas de energia, divididas em centrais elétricas e instalações de cogeração (BANCO MUNDIAL, 2014).

³¹ BANCO MUNDIAL. Electric power transmission and distribution losses (% of output). 2014. Disponível em <<http://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?end=2013&start=1960>> Acesso em: 2 jul. 2017.

³² Um indicador econômico que mede as mudanças na produção para o setor industrial da economia. O setor industrial inclui fabricação, mineração e serviços públicos. Os dados estão em US\$ constantes e não são ajustados sazonalmente. O ano base é 2005 (BANCO MUNDIAL, 2018 [b]).

dependendo do conjunto de matérias-primas utilizado em cada país haverá uma maior ou menor eficiência da conversão. Em outras palavras, se é utilizada uma mistura de matérias-primas com maior eficiência, mais energia elétrica será produzida com menor quantidade de energia primária. Considerando que se for utilizada mais matéria-prima, haverá, proporcionalmente, maior emissão de CO₂e, países que usam matérias-primas mais “eficientes” terão um potencial de redução de emissões menor.

O tipo da tecnologia utilizado para a produção de eletricidade também afetará a eficiência da transformação. Tecnologias mais eficientes, demandarão menos uso de combustíveis por unidade de energia elétrica produzida.

Outro elemento considerado para harmonização do tipo E foram as perdas de energia elétrica durante sua transmissão e distribuição, considerando a trajetória do gerador que a produz, até seu usuário final (indústrias).

Numa transmissão com menores perdas de energia elétrica, haverá uma maior eficácia do processo e, conseqüentemente, menos uso de combustíveis fósseis para se produzir energia elétrica e, com isso, menores emissões de CO₂. Isto implicará num potencial de redução de emissões menor, comparado a outro país com maiores perdas de energia elétrica.

4.5.3. Harmonização do Custo Marginal de Abatimento

Para que os valores correntes (nominais) dos custos marginais de abatimento (MAC), presentes em cada artigo consultado, possam ser convertidos para valores do ano de 2014 (ano base) é necessária a conversão por meio de índices de preços.

Como a maioria dos valores encontrados nas fontes originais de dados utilizadas foi divulgada em dólares, optou-se pela utilização do índice de preço ao consumidor (IPC) americano.

Os valores anuais do IPC foram obtidos segundo *United States Bureau of Labor and Statistics* (2014).

Para a harmonização dos custos foi utilizada a Equação 6.

$$C_{(br)} = IPC_{(p)} \cdot C_{(a)} \quad (Eq. 6)$$

Onde:

$C_{(br)}$ = MAC no Brasil, em 2014 (US\$/tCO₂e);

$C_{(a)}$ = MAC do país x, no ano y (US\$/tCO₂e);

IPC_(p) = índice de preço ao consumidor no período (ano y* até 2014);

x = país do artigo consultado;

y = ano base do artigo consultado.

(*) o ano inicial corresponde ao ano da moeda do artigo consultado.

Todas as moedas utilizadas, presentes nos artigos consultados, estavam em dólar, por isso não foi necessário fazer a conversão utilizando as taxas cambiais.

Após harmonização das tecnologias, foi gerada a MACC, conforme procedimentos descritos na sequência.

4.5.4. Geração da MACC brasileira

Foram harmonizadas para o Brasil (ano de 2014) um total de 178 tecnologias de baixo carbono, sendo 106 pertencentes ao subsetor de cimento e 72 ao subsetor de siderurgia.

Os custos marginais de abatimento das tecnologias foram classificados do menor para o maior valor, com seus respectivos potenciais de redução de emissões.

O procedimento foi realizado separadamente para os subsetores de cimento e de siderurgia. Foram escolhidas as 10 tecnologias de menor custo, para cada subsetor, compondo, assim, uma MACC única para os dois subsetores, com um total de 20 tecnologias.

Das 178 foram selecionadas apenas 20 tecnologias, pois se fossem consideradas todas não seria possível apresentá-las de forma clara numa MACC. Assim, para contornar esta limitação, fez-se, à parte, a soma do potencial de redução das 178 tecnologias, bem como a quantidade de custos marginais economizada (considerando apenas as tecnologias com valor negativo). Os dados relacionados às 178 tecnologias estão disponíveis no Apêndice 3.

Após a construção da MACC buscou-se desenvolver um procedimento para validação da metodologia.

É importante mencionar que as duas últimas etapas da meta-análise: Etapa 6 (Interpretação dos resultados) e Etapa 7 (Conclusão), estão descritas, respectivamente, nos itens 5 (Resultados e Discussão) e 6 (Conclusão).

4.6. METODOLOGIA PARA VALIDAÇÃO

O procedimento desenvolvido para validação da metodologia foi feito por meio da busca por pares de artigos que citassem as mesmas tecnologias de baixo carbono, porém fossem realizados para países diferentes, em datas distintas.

Logo, a pesquisa resultou em dois artigos denominados aqui, por A e B e cujos autores são, respectivamente, Hasanbeigi *et al.* (2010 [b]) e Worrell *et al.* (2000).

Ambos os artigos enfocavam o subsetor de cimento, porém o artigo A era referente à Tailândia, no ano de 2008, enquanto que o artigo B, referia-se aos Estados Unidos, no ano de 1994. A taxa de desconto utilizada em ambos foi de 30%.

Os dois artigos traziam tecnologias de baixo carbono iguais entre si, uma vez que o autor de A citava B. Naturalmente, os valores correspondentes aos custos e às emissões eram diferentes, já que enfocavam países e datas distintos.

Para que a metodologia fosse validada, as tecnologias iguais de A e B, após harmonização de B, deveriam apresentar valores do custo de abatimento e do potencial de redução de emissões os mais próximos (ou iguais) possível de A.

Foi então observada a variação entre A e B (antes da harmonização de B) e, entre A e B (após harmonização de B), conforme Figura 12. Isto foi feito separadamente para o potencial de redução e para o custo marginal de abatimento de cada tecnologia.

Figura 12: Esquema para comparar as variações (Var) de tecnologias iguais entre A e B e, entre A e B harmonizado (*B_{har}*).

Fonte: Elaboração própria.

A apresentação dos resultados e a discussão sobre os procedimentos para a validação estão na seção 5.1.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção corresponde à penúltima etapa da meta-análise (Etapa 6 - Interpretação dos resultados), antes de sua conclusão (Etapa 7 - Conclusão), presente na seção 6.

Serão discutidos e apresentados os resultados dos procedimentos aplicados para a validação da metodologia (Seção 5.1). Na seção 5.2 é apresentada a MACC brasileira e é feita uma discussão sobre seus resultados.

5.1. METODOLOGIA PARA VALIDAÇÃO

As Figuras 13 e 14 mostram o resultado da comparação entre os artigos A e B, antes e após a harmonização de B (denominado como B_har). A comparação foi feita separadamente para o potencial de redução de emissões e para os custos de abatimento. Ambos os gráficos estão em escala logarítmica, de modo a ajustar automaticamente a escala para que cada barra do gráfico seja visível.

Figura 13: Comparação entre o potencial de redução de emissões das tecnologias dos artigos A e B, antes e após harmonização de B (B_har).

Fonte: Elaboração própria.

Figura 14: Comparação entre o MAC das tecnologias dos artigos A e B, antes e após a harmonização de B (B_har).
Fonte: Elaboração própria.

Os resultados de ambas as figuras (Figura 13 e 14) mostram que, tanto para o potencial de redução de emissões quanto para o custo marginal de abatimento, a diferença entre A e B diminuiu significativamente, após a harmonização de B. Essa diferença foi maior entre as emissões que entre os custos, indicando uma harmonização mais eficiente para as emissões. Não foi possível identificar se a harmonização foi melhor sucedida conforme o tipo de tecnologia (C ou E), uma vez que seria necessário um conjunto amostral maior.

Logo, apesar de reduzir as diferenças entre os artigos A e B, os valores encontrados após a harmonização devem ser refinados para que a metodologia consiga uma maior acurácia. Isto pode ser feito aumentando o número de variáveis nela, até que os valores harmonizados se tornem mais próximos.

Os resultados obtidos pela aplicação dos procedimentos para validação ofereceram subsídios para realizar um levantamento sobre os aspectos que podem ser utilizados no refinamento da metodologia (tanto de harmonização quanto para validação).

O primeiro aspecto seria em relação aos artigos utilizados no procedimento para validação. O ideal seria que mais pares de países fossem comparados de modo a entender se (e quanto) isto influenciaria nos resultados pós-harmonização. O mesmo vale para as

datas/períodos de estudo considerados nestes artigos. Contudo, artigos que tragam exatamente as mesmas tecnologias e possam ser comparáveis, são escassos.

Com relação à metodologia de harmonização, um aspecto a ser ressaltado é relacionado à classificação das tecnologias nos tipos C (calor) ou E (eletricidade). Esta classificação é apenas uma aproximação, já que elas podem ser enquadradas em mais de uma categoria. Há artigos nos quais o próprio autor traz uma lista com valores referentes às economias de energia separadas em combustível, eletricidade ou energia primária (vide WORRELL *et al.*, 2000 e WORRELL *et al.*, 2001) ou aqueles que já as classificam, separadamente, em tecnologias de eficiência relacionadas ao combustível ou à eletricidade (vide HASANBEIGI *et al.*, 2010 [b]). Desta maneira, enquadrar cada tecnologia em um tipo torna-se mais fácil e, desta maneira, torna a metodologia mais precisa, uma vez que para cada uma foi desenvolvido um procedimento de harmonização diferente. Logo, deve-se dar preferência para este tipo de artigos na coleta de dados.

Outro elemento importante, que afeta o potencial de abatimento e que pode ser incluído na metodologia de harmonização é aquele relacionado ao Fator de Emissão (FE) (CO_2/TJ). O valor destes FE poderia ser desagregado para subsetores, já que a metodologia aqui desenvolvida os utiliza agregados por países.

Assim, quanto menor o nível de agregação, mais a metodologia poderia ser refinada. Ou seja, numa escala que vai de uma planta industrial, passa pelo setor industrial e os subsetores pertencentes a ele e, chega ao nível de um país (sem contar outras escalas regionais) seria, indubitavelmente, melhor utilizar os FE relacionados a uma planta industrial. No entanto, isto tornaria o levantamento dos dados ainda mais complexo, demandando mais tempo e maior conhecimento técnico para obtenção de tais informações, o que não é o objetivo do presente estudo, que é utilizar dados secundários sob uma perspectiva de unidades políticas.

Deve-se ressaltar, também a dificuldade em encontrar informações quanto menor o nível de agregação considerado, sobretudo para países subdesenvolvidos ou que não fazem parte de grandes conglomerados, como a OECD, que possui bases de dados bastante abrangentes para monitorar seus indicadores sociais, ambientais e econômicos.

De acordo com Hoogwijk *et al.* (2010) e Vogt-Schilb e Hallegatte (2014) resultados de cenários globais emitidos por diferentes organizações internacionais geralmente são dados ao nível setorial, como por exemplo, a indústria como um todo ou os transportes;

sem desagregação adicional. Isto prejudica os analistas interessados em tecnologias específicas e que desejam elaborar cenários de eficiência energética utilizando abordagens *bottom-up* e, que por isso, necessitam de informações com maior detalhe para entender as opções específicas de mitigação. Outra crítica é a de que estimativas de custos de opções de redução de tecnologias individuais e estratégias de redução são relatados, na literatura, através de uma curva de custo detalhada apenas para alguns dos setores industriais mais intensivos em energia, no entanto, este tipo de análise detalhada não está disponível para todos os setores e, muitas vezes, só está disponível para um país específico (HOOGWIJK *et al.*, 2010).

Com relação aos FE relacionados à eletricidade (CO_2/kWh), estes não poderiam ser desagregados para subsetores (a menos que eles produzissem a energia elétrica que consomem), uma vez que aqui é considerada a energia fornecida a eles pela rede e, por essa razão, deve-se considerar o *mix* energético do país. Pode-se, entretanto, desagregá-lo por região, como estado ou cidade, porém esta análise leva em conta o conhecimento da origem da energia elétrica produzida. Nesse sentido, as perdas de distribuição e transmissão da energia elétrica também teriam de ser desagregadas de país, como o que foi proposto no presente estudo, para estados ou cidades.

Outro elemento que poderia ser incluído na metodologia é a taxa de desconto. Hasanbeigi *et al.* (2010 [c]) contabilizando o potencial de redução e custos de abatimento de CO_2 de 41 tecnologias para a indústria de cimento tailandesa, no período de 2010 a 2025, realizou um estudo de sensibilidade para diferentes taxas de desconto. Segundo ele, a taxa de desconto utilizada desempenha um papel importante na análise dos potenciais de redução de CO_2 e não apenas nos resultados do custo de abatimento. Em geral, a redução da taxa de desconto reduzirá o custo de abatimento, que pode ou não aumentar o potencial de redução de CO_2 (HASANBEIGI *et al.*, 2010 [c]).

O teste de sensibilidade para diversas taxas de desconto foi usado para entender sua influência nos potenciais de redução econômica, ao se manter todos os outros fatores constantes. O resultado está apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Análise de sensibilidade para os potenciais de redução de CO₂ econômicos na indústria de cimento tailandesa com diferentes taxas de desconto.

Taxa de desconto (%)	Redução anual efetiva de CO ₂ em relação ao período de cenário (ktCO ₂ /ano)	Custo de redução de CO ₂ acumulado para todas as medidas ^a (US\$/tCO ₂)
dr = 5	3.097	-1.426,8
dr = 10 ^b	3.095	-709,3
dr = 15	2.718	-254,3
dr = 20	2.717	48,9
dr = 30	2.125	412,9

a: Os custos de abatimento de CO₂ (CAC) são apresentados apenas como indicadores para ilustrar que, embora a mudança na taxa de desconto possa não resultar em uma alteração substancial na redução econômica do CO₂, isso alterará significativamente o CAC das medidas de redução independentemente.

b: Uma taxa de desconto de 10% é o cenário básico que é usado na principal análise apresentada neste artigo.

Fonte: Hasanbegi *et.al.* (2010 [c]).

Hasanbeigi *et al.* (2010 [c]) descobriu que a redução da taxa de desconto de 10% para 5% aumenta o potencial anual de redução de CO₂, ligeiramente, de 3.095 ktCO₂/ano para 3.097 ktCO₂/ano. No entanto, deve-se notar que, embora a mudança na relação custo-efetividade seja menor, a mudança no custo acumulado de abatimento de CO₂ de todas as medidas é mais significativa. Isto mostra que o custo acumulado de abatimento do CO₂ diminuirá com o declínio na taxa de desconto. Isso funciona em sentido inverso quando a taxa de desconto aumenta de 10% para 15%, 20% e 30%. A redução técnica total anual de CO₂, durante o período de cenário, não mudou com a variação da taxa de desconto. O autor finaliza a análise concluindo que a taxa de desconto de 30% é mais representativa para uma perspectiva do setor privado.

Na metodologia aqui desenvolvida não foi incluída a taxa de desconto, pois para incluí-la seria necessário que os artigos informassem, também, a vida útil de cada tecnologia, o que nem sempre acontecia. No procedimento empregado para validação, contudo, foram utilizados artigos que consideraram a mesma taxa de desconto (de 30%). Desta maneira, isto não afeta os resultados aqui apresentados.

As MACCs são construídas comparando, para cada tecnologia, cenários de referência com cenários de baixo carbono. O cenário de baixo carbono, na verdade, é um cenário que engloba uma análise de custo-benefício entre valores dos dois cenários. Para construção destes cenários diversos elementos devem estar incluídos para que a análise

se torne o mais transparente possível, tanto no cenário de referência quanto no de baixo carbono.

Os elementos utilizados na construção dos cenários que podem afetar no resultado do custo de abatimento são: variações nos preços da energia; subsídios para custear a energia ou a implementação de tecnologias; taxas e impostos embutidos no preço da energia ou da tecnologia; taxas de importação para tecnologias não nacionais; custos de capital; custos de manutenção; custos de operação, que podem ficar mais baratos quanto mais seus operadores se qualifiquem; taxa de desconto; receitas obtidas; compatibilidade entre tecnologias, sendo que a implementação de uma nova tecnologia pode ser incompatível com aquela do cenário de referência, ou mesmo, com outras do cenário de baixo carbono, aumentando o custo de implementação. Hasanbeigi *et al.* (2010 [c]) destaca que alguns outros custos, como treinamento e pesquisa em tecnologias não são levados em consideração no cálculo dos custos de abatimento.

Já os fatores usados na construção dos cenários e que podem afetar o potencial de abatimento são: variações no uso de combustíveis fósseis (ou não fósseis); mudanças na matriz energética de um país, que podem afetar tanto os fatores de emissão relacionados à energia primária quanto aqueles relacionados à eletricidade; variações na produção industrial; variação na composição do produto manufaturado (como por exemplo, no teor de clínquer do cimento); avanços tecnológicos que resultam em maior eficiência da tecnologia e que são impossíveis de se mensurar para o futuro, entre outros.

Além disso, a quantificação do potencial de redução e dos custos de abatimento, seja por acesso às informações ou erro nos cálculos, pode subestimar ou superestimar tais valores, tanto na construção do cenário de baixo carbono quanto dos cenários de referência.

Desta maneira, a construção dos cenários passa pela inclusão de diversas variáveis que devem ser mensuradas adequadamente e da utilização de fontes confiáveis de informação. A qualidade dos dados coletados no presente estudo depende muito destes pressupostos. Incluir novas variáveis na análise também depende da divulgação dos pressupostos incluídos/excluídos em cada estudo original.

Além disso, a inclusão de pressupostos não declarados (utilizados para construção dos cenários) na metodologia aqui desenvolvida, requereria um estudo mais aprofundado da microeconomia de cada país, com valores confiáveis e de qualidade. Contudo, investigar

tais aspectos à fundo poderia ser dispendioso, tanto em tempo quanto em recursos financeiros e técnicos, distanciando-se do objetivo deste estudo que é comparar regiões utilizando-se dados da literatura já calculados, do potencial de redução de emissões e dos custos de abatimento e não criar cenários para a construção da MACC.

Deve-se mencionar que embora a metodologia tenha sido aplicada para comparar países (e o procedimento para validação tenha seguido a mesma lógica), ela foi desenvolvida para comparar pares de qualquer unidade política, sendo ela semelhante (por exemplo: cidades com cidades, países com países, províncias com províncias) ou diferente (por exemplo: países com cidades, cidades com estados). Para tanto é necessário ter dados suficientes para o cálculo dos fatores de harmonização. Um exemplo disto seria a necessidade de harmonizar dados da China, do ano de 2000 para a cidade de São Paulo, no ano de 2018. Um dos elementos requerido, neste caso, seria ter dados referentes ao fator de emissão (além dos demais fatores de harmonização) da China, no ano de 2000 e da cidade de São Paulo, no ano de 2018. Ou, na sua ausência de dados para cidades, recalcular fatores de emissão de países para que correspondam às de cidades (ou demais unidades políticas), seguindo-se as devidas proporções.

Assim, apesar de alguns refinamentos serem necessários, sobretudo relacionados ao nível de agregação considerado e, respeitando-se as limitações mencionadas, a metodologia foi capaz de adaptar e aproximar, de forma significativa, o potencial de redução e o custo de abatimento entre duas unidades políticas diferentes, em épocas distintas.

5.2. MACC BRASILEIRA

A Figura 15 mostra a MACC gerada para o Brasil, no ano de 2014, com as 20 tecnologias dos subsetores de cimento e de siderurgia. A MACC está disponível também no Apêndice 5.

Todas as tecnologias possuem custos negativos (estão abaixo do eixo x). Os códigos numéricos de cada tecnologia, nesta figura, fazem referência ao *re-MACC*, para possibilitar o rastreamento das informações. Os valores harmonizados utilizados para a geração da MACC podem ser encontrados no Apêndice 4.

Figura 15: MACC para o Brasil (ano de 2014) para os subsetores de cimento [CIM] e de siderurgia [SID]. A letras entre colchetes referem-se às tecnologias do tipo C (Calor) ou E (Eletricidade).

Fonte: Elaboração própria.

Pelo gráfico é possível notar que a tecnologia com menor custo de abatimento é a “Estabelecimento do centro de gerenciamento de energia” (código 36) do subsetor de siderurgia. Sua adoção é capaz de gerar uma economia de 145,08 US\$₂₀₁₄/tCO₂e e reduzir 0,22 MtCO₂e/ano. A tecnologia com maior potencial de redução de emissões é a “Renovação de fornos para produção de cimento úmido” (código 51), do subsetor de cimento, podendo reduzir 0,43 MtCO₂e/ano e economizar 13,9 US\$₂₀₁₄/tCO₂e.

Dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa - (SEEG, 2018) indicam que, em 2014, as emissões foram de 25.658.543 tCO₂, para a produção de cimento e de 41.202.059 tCO₂, para a produção de ferro-gusa e aço. Caso o Brasil adotasse as 20 tecnologias de baixo carbono aqui propostas, seria possível reduzir aproximadamente 2,7% destas emissões e economizar 572,8 US\$₂₀₁₄/tCO₂e, no ano de 2014.

Entretanto, tais valores seriam ainda mais significativos se o Brasil adotasse as 178 tecnologias propostas (vide Apêndice 3). Nesse, caso seria possível reduzir 35.027.042 tCO₂e, no ano de 2014. Isto corresponderia a 52,4% do total de emissões em ambos os subsetores. Além disso, seria possível economizar um total de 1.835 US\$₂₀₁₄/tCO₂e, implantando-se tais tecnologias.

Estas tecnologias, por terem valores de custo de abatimento negativos, são também chamadas de “*no regrets*” pois, além de reduzir as emissões de CO₂, ainda economizam dinheiro ao serem adotadas. Segundo Kesicki (2010) (vide discussão na seção 3.1.3, figura 2) para serem implementadas, estas tecnologias tendem a demandar políticas de comando e controle, uma vez que, teoricamente, não haveria o porquê de elas não serem adotadas. Contudo há que se considerar as barreiras do mercado, como falta de informação, incentivos ou custos não apresentados de maneira clara às partes interessadas.

Exemplos de instrumentos de comando e controle são campanhas de informação e rotulagem obrigatória, certificação ou medição e regulamentos para restringir ou proibir o uso de tecnologias ineficientes (KESICKI, 2010). Tais instrumentos poderiam facilitar a adoção das tecnologias aqui propostas. Além disso, a MACC apresentada poderia auxiliar na configuração dos níveis de subsídios necessários às suas implantações.

A adoção final destas tecnologias, entretanto, exige um compromisso político que resulta de discussões entre as partes interessadas. Neste sentido, a metodologia aqui

desenvolvida, bem como as tecnologias de baixo carbono aqui apresentadas, podem ser úteis para estimular a evolução nas discussões rumo a um futuro mais sustentável.

6. CONCLUSÃO

O trabalho desenvolveu uma metodologia de adaptação de MACC, a partir de dados secundários da literatura, para qualquer unidade política ou ano de interesse.

Para tanto foi elaborada uma metodologia de seleção e coleta de dados envolvendo estudos MACC e desenvolvida uma metodologia para sua adaptação, utilizando ferramentas de meta-análise e de harmonização. Esta metodologia foi aplicada ao *Access*® de modo a organizar os dados coletados e automatizar os cálculos necessários à harmonização. A essa ferramenta deu-se o nome de *re-MACC*.

A metodologia foi usada para a geração de uma MACC para os subsetores de cimento e de siderurgia brasileiros, apresentando as 20 tecnologias com o menor custo marginal de abatimento de emissões de CO₂e.

Foram harmonizadas um total de 178 tecnologias de baixo carbono que, se fossem implementadas no Brasil, conseguiriam reduzir aproximadamente 52,4% das emissões oriundas da produção de cimento, ferro e aço e, ainda, economizar um total de 1.835 US\$₂₀₁₄/tCO₂e, no ano de 2014.

Baseando-se nos resultados e discussões, pode-se elencar, sinteticamente, algumas sugestões para trabalhos futuros, buscando-se o aprimoramento da metodologia, conforme segue:

- Revisar os critérios de elegibilidade de modo a encontrar artigos que forneçam valores separados referentes às economias de energia de cada tecnologia;
- Entender como (ou se) o tipo de tecnologia (Tipo C - Calor ou Tipo E - Eletricidade) influencia na qualidade dos resultados harmonizados;
- Entender como (ou se) os pares de países considerados afetam na qualidade dos resultados harmonizados. O mesmo pode ser feito para datas/períodos de estudo entre pares de artigos;
- Desagregar os fatores de harmonização, respeitando-se as devidas limitações, para testar sua influência na harmonização;
- Incluir a variável taxa de desconto nos cálculos;
- Considerar a hipótese de adesão de novas variáveis nos cálculos.

Logo, a metodologia desenvolvida no presente trabalho foi capaz de adaptar os resultados de estudos MACC para qualquer unidade política ou ano, todavia refinamentos devem ser realizados para torná-la ainda mais acurada.

REFERÊNCIAS

AKASHI, O.; HANAOKA, T.; MATSUOKA, Y.; KAINUMA, M. **A projection for global CO₂ emissions from the industrial sector through 2030 based on activity level and technology changes.** Energy, v. 36, n. 4, p. 1855–1867, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210004524>>. Acesso em: 01 abr. 2018.

AKIMOTO, K.; SANO, F.; HOMMA, T.; WADA, K.; NAGASHIMA, M.; ODA, J. **Comparison of marginal abatement cost curves for 2020 and 2030: longer perspectives for effective global GHF emission reductions.** Kyoto: Sustainability Science, v.7, p.157–168. 2012. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11625-012-0165-5>>. Acesso em: 11 abr. 2017.

ANDERSON, D. **Costs and Finance of Abating Carbon Emissions in the Energy Sector.** Imperial College London. 2006.

BANCO MUNDIAL. **Electric power transmission and distribution losses (% of output).** 2014. Disponível em <<http://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?end=2013&start=1960>> Acesso em 02 de julho de 2014.

BANCO MUNDIAL [a]. **Gross domestic product 2016. World Development Indicators.** Atualizado em 2018 de Abril de 2018. Disponível em <<https://datacatalog.worldbank.org/dataset/gdp-ranking>> Acesso em: 18 mai. 2018.

BANCO MUNDIAL [b]. **DataBank. Global Economic Monitor (GEM): industrial production, constant US\$.** 2018. Disponível em: <[databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-\(gem\)](http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem))> Acesso em: 20 jan. 2018.

BEAUMONT, J. N.; TINCH, R. **Abatement cost curves: a viable management tool for enabling the achievement of win-win waste reduction strategies?** Journal of Environmental Management 71 (3), 207–215. 2004.

BLOK, K.; DE JAGER, D.; HENDRIKS, C.; KOUVARITAKIS, N.; MANTZOS, L. **Economic Evaluation of Sectoral Emission Reduction Objectives for Climate Change: Comparison of ‘Top-down’ and ‘Bottom-up’ Analysis of Emission Reduction Opportunities for CO₂ in European Union.** Memorandum, Contribution to Environment Directorate General, European Commission by Ecofys Energy and Environment, Utrecht, Netherlands, AEA Technology Environment, London, and National Technical University of Athens, Athens. 16 p. Set. 2001. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/de1a/5a66eb5d194a7405f0dbcfa76bbb5c435bb8.pdf>> . Acesso em: 30 abr. 2016.

BLOK, K.; WORRELL, E.; CUELENAERE, R.; TURKENBURG, W. **The cost effectiveness of CO₂ emission reduction achieved by energy conservation.** Energy Policy, 21, pp. 656–667, jun. 1993. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030142159390289R>> Acesso em: 20 abr. 2017.

BORSCHIVER, S. WONGSTSCHOWSKI, P.; ANTUNES, A. **A classificação industrial e sua importância na análise setorial.** Ci. Inf., Brasília, v. 33, n. 1, p. 9-21, jan-abril. 2004. Disponível em: <www.scielo.br/pdf/ci/v33n1/v33n1a02.pdf>. Acesso em: 29 set. 2014.

BOVENBERG, L.; GOULDER, L. **Neutralizing the Adverse Industry Impacts of CO₂ Abatement Policies: What Does It Cost?** Behavioral and Distributional Impacts of Environmental Policy. C. Carraro and G. Metcalf. Chicago, University of Chicago Press. 2000. Disponível em < <http://www.nber.org/papers/w7654.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. **Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC, e dá outras providências.** Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/12187.htm>. Acesso em: 03 jan. 2015.

BRUCE, J. P.; LEE, H.; HAITES, E. F. **Climate change 1995: economic and social dimensions of climate change; contribution of Working Group III to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, UK: Cambridge, Univ. Press. 458p. 1996. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/ipccreports/sar/wg_III/ipcc_sar_wg_III_full_report.pdf> Acesso em: 03 de mar. 2015.

BUDIN-LJOSNE, I.; ISAEVA, J.; KNOPPERS, B. M.; TASSÉ, A. M.; SHEN, H.; MCCARTHY, M. I.; HARRIS, J. R.; ENGAGE Consortium. **Data sharing in large research consortia: experiences and recommendations from ENGAGE.** Eur J Hum Genet, Pp 317-321, advance online publication, 19 June. 2013. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23778872>> Acesso em: 03 de mar. 2015.

BURKHARDT, J.; HEATH, G.; COHEN, E. **Life cycle greenhouse gas emissions of trough and tower concentrating solar power electricity generation: Systematic review and harmonization.** Journal of Industrial Ecology. Vol. 16, s1, pp. S93-S109, 2012. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1530-9290.2012.00474.x/abstract>>. Acesso em: 16 jun. 2017.

CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **1º Inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo: Período 1990 a 2008.** Comunicação Estadual. Sumário Executivo. São Paulo, 2011.

COOK, D. J.; SACKETT, D. L.; SPITZER, W. O. **Methodologic guidelines for systematic reviews of randomized control trials in health care from the potsdam consultation on meta-analysis.** Journal of Clinical Epidemiology, v. 48, p. 167-171. 1995. Disponível em < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7853043>>. Acesso em 11 nov. 2015.

DEDINEC, A.; MARKOVSKA, N.; RISTOVSKI, I.; VELEVSKI, G.; GJORGJEVSKA, V. T.; GRNCAROVSKA, T. O.; ZDRAVEVA, P. **Economic and environmental evaluation of climate change mitigation measures in the waste sector of developing countries.** Journal of Cleaner Production, Vol. 88, pp. 234-241, fev. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614005174>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

DEEKS, J. J.; HIGGS, J. P. T.; ALTMAN, D. G. **Chapter 9: Analysing data and undertaking meta-analyses.** Pp.243-296. The Cochrane Book Series. 2008. Disponível em: <hiv.cochrane.org/sites/hiv.cochrane.org/files/uploads/Ch09_Analysing.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2015.

DE GOUVELLO, C. **Estudo de Baixo Carbono para o Brasil.** Banco Mundial, p. 280, Washington D. C., 2010. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio_Principal_integra_Portugues.pdf>. Acesso em: 3 maio. 2017.

DEL RÍO GONZÁLEZ, P. **Policy implications of potential conflicts between short-term and long-term efficiency in CO₂ emissions abatement.** Ecological Economics 65 (2), 292–303. 2008.

DE MELO, C. A.; JANNUZZI, G. M. **Cost-effectiveness of CO₂ emissions reduction through energy efficiency in Brazilian building sector.** Energy Efficiency, Vol. 8, Ed. 4, pp. 815-826, jul. 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12053-014-9322-2>>. Acesso em: 01 maio. 2017.

DE OLIVEIRA SILVA, R.; BARIONI, L. G.; ALBERTINI, T. Z.; EORY, V.; CAIRISTIONA, F. E. T.; FERNANDEZ, F. A.; MORAN, D. **Developing a nationally appropriate mitigation measure from the greenhouse gas GHG abatement potential from livestock production in the Brazilian Cerrado.** Agricultural systems, Vol. 140, pp. 48-55, nov. 2015. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X15300238>>. Acesso em: 03 mai.2018.

DOIRON, D.; RAINA, P. L'HEUREUX, F.; FORTIER, I. **Facilitating collaborative research: Implementing a platform supporting data harmonization and pooling.** Norsk Epidemiologi, Vol. 21 (2), pp. 221-224, 2012. Disponível em: <<http://www.ntnu.no/ojs/index.php/norepid/article/view/1497>>. Acesso em: 07 maio. 2017.

DOIRON, D.; BURTON, P.; MARCON, Y.; GAYE, A.; WOLFFENBUTTEL, B. H. R.; PEROLA, M.; STOLK, R. P.; FOCO, L.; MINELLI, C.; WALDENBERGER, M.; HOLLE, R.; KVALOY, K.; HILLEGE, H. L.; TASSE, AM.; FERRETTI, V.; FORTIER, I. **Data harmonization and federated analysis of population-based studies: the BioSHaRE Project.** Emerging Themes in Epidemiology. Vol. 10, 12 p, 2013. Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24257327>>. Acesso em: 07 maio. 2017.

DOLAN, S.; HEATH, G. **Life cycle greenhouse gas emissions of utility-scale wind power: Systematic review and harmonization.** Journal of Industrial Ecology, Vol. 16. n. S1. Pp. 136-154, 2012. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1530-9290.2012.00464.x>>. Acesso em: 07 maio. 2016.

EKINS, P.; KESICKI, F.; SMITH, A. Z. P. **Marginal Abatement Cost Curves: A call for caution.** University College London, London, 2011. 37 p. Disponível em: <<https://www.ucl.ac.uk/energy/home-top-cols/image-link-docs/MACCCritGPKUKFin.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

ELLERMAN, A. D.; DECAUX, A. **Analysis of Post-Kyoto CO2Emissions Trading Using Marginal Abatement Curves.** 1998. Disponível em <web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC_Rpt40.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2017.

ENERDATA. **EnerFuture MACC®.** Versão de teste. Disponível em <<http://forecasts.enerdata.net/database/>>. Consulta realizada em 21 de março de 2017.

EPA: UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY; NATIONAL CENTER FOR ENVIRONMENTAL ECONOMICS. **Guidelines for Preparing Economic Analyses.** 2010, updated May 2014. 302 p. Disponível em: <[https://yosemite.epa.gov/ee/epa/erm.nsf/vwAN/EE-0568-50.pdf/\\$file/EE-0568-50.pdf](https://yosemite.epa.gov/ee/epa/erm.nsf/vwAN/EE-0568-50.pdf/$file/EE-0568-50.pdf)>. Acesso em: 10 mai. 2017.

EPA: UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2015.** 633 p. 2017. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-02/documents/2017_complete_report.pdf>. Acesso em: 06 mai.. 2017.

EUROPEAN COMMISSION. **Climate Action: Carbon leakage.** [sem data]. Disponível em: <https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/allowances/leakage_en>. Acesso em: 26 mar. 2017.

FAN, Y.; PENG, B.; XU, J. **The effect of technology adoption on CO₂ abatement costs under uncertainty in China's passenger car sector.** Journal of cleaner production, Vol. 154, pp. 578-592, jun. 15. 2017 Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617307011>>. Acesso em: 26 ago. 2017.

FARUQUI, A.; MAULDIN, M.; SCHICK, S.; SEIDEN, K.; WIKLER, G.; GELLINGS, C. W. **Efficient Electricity Use: Estimates of Maximum Energy Savings.** Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (USA); Barakat and Chamberlin, Inc., Oakland, CA (USA). 1990.

GILLENSON, M. L. **Fundamentos de sistemas de gerência de banco de dados**. Rio de Janeiro: LTC. 304 p. 2006.

GRANDA, P; BLASCZYC, E. **XIII Data Harmonization: Introduction**. Separata de: Cross-Cultural Survey Guidelines. 2010. Disponível em <ccsg.isr.umich.edu/pdf/13DataHarmonizationNov2010.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2015.

GRIFFITH, L. E.; VAN DEN HEUVEL, E.; FORTIER, I.; SOHEL, N.; HOFER, S. M.; PAYETTE, H.; WOLFSON, C.; BELLEVILLE, S.; KENNY, M.; DOIRON, D.; RAINA, P. **Statistical approaches to harmonize data on cognitive measures in systematic reviews are rarely reported**. Journal of Clinical Epidemiology. Vol. 68, n. 2, pp. 154–162. Feb. 2015.

GRUBLER, A.; NAKICENOVICA, N.; VICTORB, D. G. **Dynamics of energy technologies and global change**. Energy Policy. Volume 27, Issue 5, Pages 247-280. May, 1999. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421598000676>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

HAMILTON, C. M.; STRADER, L. C.; PRATT, J. G.; MAIESE, D.; HENDERSHOT, T.; KWORK, R. K.; HAMMOND, J. A.; HUGGINS, W.; JACKMAN, D.; PAN, H.; NETTLES, D. S.; BEATY, T. H.; FARRER, L. A.; KRAFT, P.; MARAZITA, M. L.; ORDOVAS, J. M.; PATO, C. N.; SPITZ, M. R.; WAGENER, D.; WILLIAMS, M.; JUNKINS, H. A.; HARLAN, W. R.; RAMOS, E. M.; HAINES, J. **The PhenX toolkit: Get the most from your measures**. Am J Epidemiol. 174(3), pp. 253–260. 2011.

HASANBEIGI [a], A.; PRICE, L.; HONGYOU, L.; LAN, W. **Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants**. Energy, Vol. 35, pp. 3461-3473, 2010.

HASANBEIGI [b], A.; MENKE, C.; THERDYOTHIN, A. **The use of conservation supply curves in energy policy and economic analysis: The case study of Thai cement industry**. Energy Policy, 38. p.392-405. 2010. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509007137?via%3Dihub>>. Acesso em: 01 jan. 2018.

HASANBEIGI [c], A.; MENKE, C.; PRICE, L. **The CO₂ abatement cost curve for the Thailand cement industry**. Journal of Cleaner Production. Volume 18, Issue 15, Pages 1509-1518, November 2010. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652610002179?via%3Dihub>>. Acesso em: 27 abr. 2015.

HEATH, G. A.; MANN, M. K. **Background and Reflections on the Life Cycle Assessment Harmonization Project**. Journal of Industrial Ecology, Vol. 16, n. S1, pp. S8-S11. 2012. Disponível em <onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1530-9290.2012.00478.x/epdf>. Acesso em: 27 abr. 2015.

HEATH, G. A.; DONOUGHUE, P. O.; ARENT, D. J. A.; BAZILIAN, M. **Harmonization of initial estimates of shale gas life cycle greenhouse gas emissions for electric power generation.** Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America. Vol. 111, n. 31, 5 ago. 2014. Disponível em <www.pnas.org/content/111/31/E3167.abstract>. Acessado em 5 de janeiro de 2015.

HEITMANN, N.; PETERSON, S. **The potential contribution of the shipping sector to an efficient reduction of global carbon dioxide emissions.** Environmental science & policy, Vol. 42, pp. 56-66, out. 2014.

HENDRIKS, C. A.; WORRELL, E.; DE JAGER, D.; BLOK, K.; RIEMER, P. **Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry.** 2004. From: In: The Proceeding of the Greenhouse Gas Control Technologies Conference. Disponível em <<https://www.wbcsdcement.org/pdf/tf1/prghgt42.pdf>>. Acessado em 05 de janeiro de 2016.

HENRIQUES, M. F.; DANTAS, F.; SCHAEFFER, R. **Potential for reduction of CO₂ emissions and a low-carbon scenario for the Brazilian industrial sector.** Energy Policy, 2010.

H. M. GOVERNMENT. **Analytical Annex.** Separata de: The UK Low Carbon Transition Plan, The Stationary Office, London, 2009. 220p. 2009.

HOOGWIK, M.; DE LA RUA DU CAN, S.; NOVIKOVA, A.; URGE-VORSATZ, D.; BLOMEN, E.; BLOK, K. **Assessment of bottom-up sectoral and regional mitigation potentials.** Energy Policy, Vol. 38, n. 6, pp. 3044–3057, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.045>>. Acesso em: 29 out. 2017.

HOORCADE, J. C.; JACCARD, M.; BATAILLE, C.; GHERSI, F. **Hybrid Modeling: New Answers to Old Challenges Introduction to the Special Issue of "The Energy Journal".** The Energy Journal. Vol. 27, Special Issue: Hybrid Modeling of Energy-Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down, pp. 1-11. 2006.

HSU, D. D.; O'DONOUGHUE, P.; FTHENAKIS, V.; HEATH, G. A.; KIM, H. C.; SAWYER, P.; CHOI, JK.; TURNEY, D. E. **Life cycle greenhouse gas emissions of crystalline silicon photovoltaic electricity generation: Systematic review and harmonization.** Journal of Industrial Ecology. Vol. 16. n. S1, pp. S122-S135, 2012.

IBRAHIM, N.; KENNEDY, C. A. **Methodology for Constructing Marginal Abatement Cost Curves for Climate Action in Cities.** Energies, Vol. 9, n. 4, p. 227, 23 mar. 2016. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/9/4/227>>. Acesso em: 27 abr. 2017.

ICF. **Sector Based Approaches Case Study: Brazil.** ICF, 2009.

ICF CONSULTORIA DO BRASIL. **Treinamento MACTool.** Realizado em São Paulo, nos dias 25 e 26 de maio de 2014. Apresentação em Power Point. 2014.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **CO₂ Emissions from fuel combustion highlights (2013 Edition)**. France, 2013. Disponível em: <www.iea.org/publications/freepublications/publication/co2emissionsfromfuelcombustionhighlights2013.pdf> Acesso em: 08 nov. 2014.

IEA [a]. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **CO₂ Emissions from Fuel Combustion**. p. 529. 2017. Disponível em: <http://dx.doi-org.ez67.periodicos.capes.gov.br/10.1787/co2_fuel-2017-en> Acesso em: 02 jan. 2018.

IEA [b]. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Emissions per kWh of electricity and heat output**. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi-org.ez67.periodicos.capes.gov.br/10.1787/data-00432-en>> Acesso em: 02 jan. 2018.
IMPERIALE, T. F. **Meta-analysis: when and how**. Hepatology, Vol. 29, n. 6, pp. 26S-31S, 1999.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2014**. p. 49, 2014. Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Relatorio de Sustentabilidade_2014_web.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Relatorio%20de%20Sustentabilidade_2014_web.pdf)>. Acesso em: 7 mai. 2017.

_____. **Dados consolidados do setor referentes ao ano de 2015**. 2016. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/dados.asp>>. Acesso em: 7 mai. 2017.

_____. **Estatística Preliminar: março 2017**. 2017. 10 p. Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/ESTATIS PDF/Preliminar_Abril_2017.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/ESTATIS%20PDF/Preliminar_Abril_2017.pdf)>. Acesso em: 08 mai. 2017.

IPCC: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**. Japan. 2006.

_____. **Vol. 3: Industrial Processes and Product Use**. 2006. Separata de: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006. Disponível em <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/3_Volume3/V3_1_Ch1_Introduction.pdf>. Acesso em: 09 mar. 2017.

_____. **2007: Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. Disponível em <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_full_report.pdf> Acesso em: 16 mai. 2018.

_____. **Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. 2011. Disponível em: <srren.ipcc-wg3.de>. Acesso em: 14 nov. 2014.

_____. **Chapter 10: Industry. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. 2014. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter10.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2017.

JACKSON, T. **Least-cost greenhouse planning supply curves for global warming abatement.** Energy Policy, n.19, pp. 35 –46, 1991.

JIA, X. **Sectoral co-control of air pollutants: case of a chlor-alkali/polyvinyl chloride sector in China.** Journal of cleaner production, Vol. 112, pp. 1667-1675, jan. 2016.

JONES, A. K.; JONES, D. L; CROSS, P. **Developing farm-specific marginal abatement cost curves: Cost-effective greenhouse gas mitigation opportunities in sheep farming systems.** Land use policy, Vol. 49, pp. 394-403, Special Edition: SI, dez. 2015.

KENNEDY, M. **Ireland's Future: A Low Carbon Economy? The Impact of Green Stimulus Investment.** IAEE European Conference, Vilnius, Lithuania. 2010.

KESICKI, F. **Marginal abatement cost curves for policy making – expert-based vs. model-derived curves.** 2010. Disponível em:
<http://www.homepages.ucl.ac.uk/~ucft347/Kesicki_MACC.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2017.

KESICKI, F.; STRACHAN, N. **Marginal abatement cost (MAC) curves: confronting theory and practice.** Environmental Science and Policy, 14 (8), pp. 1195-1204. 2011.

KESICKI, F.; EKINS, P. **Marginal abatement cost curves: a call for caution.** Climate Policy, 12, 219–236. 2012. Disponível em
<<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10666-012-9330-6>>. Acesso em: 15 mai. 2018.

KESICKI, F. **Marginal Abatement Cost Curves: Combining Energy System Modelling and Decomposition Analysis.** Environmental Modeling & Assessment, Vol. 18, n. 1, pp. 27–37, 10 fev. 2013. Disponível em:
<<http://link.springer.com/10.1007/s10666-012-9330-6>>. Acesso em: 28 abr. 2017.

KIM, H. C.; FTHENAKIS, V.; CHOI, J. K.; TURNEY, D. E. **Life cycle greenhouse gas emissions of thin-film photovoltaic electricity generation: Systematic review and harmonization.** Journal of Industrial Ecology, Vol. 16, n. S1, pp. S110-S121, 2012.

KLEPPER, G.; PETERSON, S. **Marginal abatement cost curves in general equilibrium: The influence of world energy prices.** Resource and Energy Economics. Vol. 28, n. 1, pp. 1–23, jan. 2006. Disponível em:
<www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928765505000230>. Acesso em: 07 abr. 2017.

KO, L.; CHEN, C. Y.; LAI, J. W.; WANG, Y. H. **Abatement cost analysis in CO₂ emission reduction costs regarding the supply-side policies for the Taiwan power sector.** Energy Policy, Vol. 61, p. 551-561, 2013.

KONADU, D. D.; MOURÃO, Z. S.; ALLWOOD, J. M.; RICHARDS, K. S.; KOPEC, G. M.; MCMAHON, R. A.; FENNER, R. A. **Not all low-carbon energy pathways are environmentally “no-regrets” options.** *Global Environmental Change*, Vol. 35, pp 379-390, nov. 2015. Disponível em:

<www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378015300601?via%3Dihub>.

Acesso em: 30 jan. 2016.

KUIK, O.; BRANDER, L.; TOL, R. S. J. **Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions: A meta-analysis.** *Energy Policy*, Vol. 37, n. 4, pp. 1395–1403, 2009. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421508007295?np=y&npKey=aef93d97b1b12b595129ba13616007f8d2011bebcc19d39fdac04e0e81b90b>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

LIBERATI, A.; ALTMAN, D. G.; TETZLAFF, J.; MULROW, C.; GOTZSCHE, P. C.; IOANNIDIS, J. P. A.; CLARKE, M.; DEVEREAUX, P. J.; KLEIJNEN, J.; MOHER, D. **The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration.** *BMJ*, Vol. 339, jun. 2009. Disponível em: <<http://www.bmj.com/content/339/bmj.b2700>>.

Acesso em: 08 mai. 2017.

LITTELL, J. H.; CORCORAN, N. J.; PILLAI, V. **Systematic reviews and meta-analysis.** New York: Oxford University Press, Inc. 2008.

MARINONI, O.; VAN GRIEKEN, M. **ABATE: A New Tool to Produce Marginal Abatement Cost Curves.** *Computational Economics*, Vol. 48, n. 2, pp. 367–377, 14 ago. 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10614-015-9524-5>>.

Acesso em: 14 abr. 2017.

MCKINSEY. **Pathways to a low-carbon economy: Version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve.** T Naucélér, PA Enkvist. 2009.

MCT. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. COORDENAÇÃO-GERAL DE MUDANÇAS GLOBAIS DO CLIMA. **Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção: Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.** Brasília, DF: MCT. 2010.

MCTI [a]. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil.** Brasília: MCTI, 2ª Ed., 2014. Disponível em: <www.mct.gov.br/upd_blob/0235/235580.pdf>. Acesso em: 04 mai. 2015.

MCTI [b]. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Terceiro inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa. Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais – produtos minerais.** Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima (CGMC) do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). 2015.

MCTI. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016.

MEIER, A. K. **Supply Curves of Conserved Energy**. Lawrence Berkeley National Laboratory, 1982. Disponível em: <<http://escholarship.org/uc/item/20b1j10d>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

MICROSOFT [a]. **Introdução a tabelas - Access**. [sem data]. Disponível em: <<https://support.office.com/pt-br/article/Introdução-a-tabelas-78ff21ea-2f76-4fb0-8af6-c318d1ee0ea7>>. Acesso em: 24 jun. 2017a.

MICROSOFT [b]. **Introdução às consultas - Access**. [sem data]. Disponível em: <<https://support.office.com/pt-br/article/Introdução-às-consultas-a9739a09-d3ff-4f36-8ac3-5760249fb65c>>. Acesso em: 24 jun. 2017b.

MICROSOFT [c]. **Guia para relações de tabelas - Access**. [sem data]. Disponível em: <<https://support.office.com/pt-br/article/Guia-para-relações-de-tabelas-30446197-4fbe-457b-b992-2f6fb812b58f>>. Acesso em: 24 jun. 2017.

MILLS, E.; WILSON, D.; JOHANSSON, T. B. **Getting started: no-regrets strategies for reducing greenhouse gas emissions**. Energy Policy, Vol. 19, pp. 526–542, 1991.

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**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-22012013-112737/publico/DissertacaoMarianaMaiaDeMiranda.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2015.

MMA: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para Consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima**. 10 p. 2015. Disponível em <www.mma.gov.br/images/arquivo/80108/BRASIL%20iNDC%20portugues%20FINAL.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2018.

MMA [a]: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. 2018. Disponível em <www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas>. Acesso em: 16 mai. 2018.

MMA [b]: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Fundamentos para a elaboração da Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC) do Brasil no contexto do Acordo de Paris sob a UNFCCC**. 13 p. 2018. Disponível em <www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/Bases_elaboracao_iNDC.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2018.

MME. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico**. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral. Brasília: MME, 2016. Disponível em: <www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/ANUÁRIO+METALÚRGICO+2016_versão+3.pdf/9595d304-7072-4313-a190-b5b97a10e7a5>. Acesso em: 28 dez. 2017.

MME. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos**. Versão Preliminar atualizada em 17 de julho de 2017. Brasília: MME, 2017. Disponível em <www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/ANUÁRIO+NÃO-METALICOS+2017.pdf/f7245be3-bea0-4b2b-82d3-07ddabe4066d>. Acesso em: 28 dez. 2017.

MORAN, D.; MACLEOD, M.; WALL, E.; EORY, V.; MCVITTIE, A.; BARNES, A.; REES, R.; TOPP, C. F. E.; MOXEY, A. **Marginal Abatement Cost Curves for UK Agricultural Greenhouse Gas Emissions**. Journal of Agricultural Economics, Vol. 62, n. 1, pp. 93–118, 2010. Disponível em: <<http://globalresearchalliance.org/wp-content/uploads/2014/01/jaeMACC.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

NAYAK, D.; SAETNAN, E.; CHENG, K.; WANG, W.; KOSLOWSKI, F.; CHENG, Y-F.; ZHU, Y.; WANG, J-K.; LIU, J-X.; MORAN, D.; YAN, X.; CARDENAS, L.; NEWBOLD, J.; PAN, G.; LU, Y.; SMITH, P. **Management opportunities to mitigate greenhouse gas emissions from Chinese agriculture**. Agriculture ecosystems & environment, Vol. 209, pp. 108-124 Edição especial: SI, nov. 2015. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880915001681>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

NEELY, J. G.; MAGIT, A. E.; RICH, J. T.; VOELKER, C. C.; WANG, E. W.; PANIELLO, R. C.; NUSSENBAUM, B.; BRADLEY, J. P. **A practical guide to understanding systematic reviews and meta-analyses**. Otolaryngology - Head and Neck Surgery, Vol. 142, n. 1, pp. 6–14, jan. 2010. Disponível em: <<http://oto.sagepub.com/lookup/doi/10.1016/j.otohns.2009.09.005>>. Acesso em: 8 mai. 2017.

OECD: ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Glossary of Statistical Terms: Carbon Dioxide Equivalent**. 2013. Disponível em: <<https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=285>>. Acesso em: 27 dez. 2017.

PORTAL BRASIL. **Saiba mais sobre o Protocolo de Quioto**. 2010. Disponível em <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2010/11/protocolo-de-quioto>>. Acesso em: 18 mai. 2018.

PYE, S. **Review and Update of UK Abatement Costs Curves for the Industrial, Domestic and Non-Domestic Sectors**. AEA Energy & Environment, Didcot. 2008.

RAMAKRISHNAN, R.; GEHRKE, J.; TRADUÇÃO: TANIWAKE, C. **Sistemas de gerenciamento de banco de dados**. 3ª ed. São Paulo: McGraw-Hill. 912p. 2008.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. **Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica.** Revista Brasileira de Fisioterapia, Vol. 11, n.1, pp. 83-89, 2007.

SANSONE, S. A.; ROCCA-SERRA, P.; HIDE, W. *et al.* **Toward interoperable bioscience data.** Nat Genet. Vol. 44, n. 2, pp. 121–126, 2012.

SEEG BRASIL. **Emissões por setor.** 2018. Disponível em <plataforma.seeg.eco.br/sectors/processos-industriais>. Acesso em: 3 jan. 2018.

SELVAKKUMARAN, S.; LIMMEECHOKCHAI, B.; MASUI, T.; HANAOKA, T.; MATSUOKA, Y. **Low carbon society scenario 2050 in Thai industrial sector.** Energy Conversion and Management, Vol. 85, pp. 663–674, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.040>>. Acesso em: 19 dez. 2016.

SERRA-MAJEM, L.; MACLEAN, D.; RIBAS, L.; BRULÉ, D.; SEKULA, W.; PRATTALA, R.; GARCIA-CLOSAS, R.; YNGVE, A.; LALONDE, M.; PETRASOVITS, A. **Comparative analysis of nutrition data from national, household, and individual levels: results from a WHO-CINDI collaborative project in Canada, Finland, Poland, and Spain.** J Epidemiol Community Health., Vol.57, n.1, pp.74–80, 2003.

SITNICKI, S.; BUDZINSKI, K.; JUDA, J.; MICHNA, A.; SZPILEWICZ, A. **Opportunities for carbon emissions control in Poland.** Energy Policy, Vol. 19, pp. 995 –1002, 1991. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030142159190120D>>. Acesso em: 03 mai.2018.

SNIC: SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual de 2013.** Brasil, 40 p., 2013. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>. Acesso em: 7 mai. 2017.

SNIC [a]: SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Resultados Preliminares (março, 2017),** 2017. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdfresultado/Resultados Preliminares Março 2017.pdf>>. Acesso em: 07 mai. 2017.

SNIC [b]: SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Dados do setor.** 2017. Disponível em: <[snic.org.br/numeros-do-setor.php](http://www.snic.org.br/numeros-do-setor.php)>. Acesso em: 14 dez. 2017.

SONNTAG, A.; SCHUBERT, U. **Input-output-analysis as a holistic approach to evaluate and rank energy policy actions. Input-output-analysis as a holistic approach to evaluate and rank energy policy actions.** p. 351-359. 2008. Disponível em <<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84881663513&origin=inward&txGid=95ce64910e0ad10ed88a6c2d6fda61bd>>. Acesso em: 07 mai. 2017.

STANLEY, T. D. **Wheat From Chaff: Meta-Analysis As Quantitative Literature Review.** Journal of Economic Perspectives, Vol. 15, n. 3, pp. 131-150, 2001.

- SWEENEY, J.; WEYANT, J. **Analysis of Measures to Meet the Requirements of California's Assembly Bill 32**. Precourt Institute for Energy Efficiency, Stanford University, Stanford, CA. 108 p. 2008.
- SZKLO, A.; SCHAEFFER, R.; DE GOUVELLO, C. **Estudo de Baixo Carbono para o Brasil: Relatório de Síntese Técnica (Energia)**. 2010. Disponível em: <<http://documents.worldbank.org/curated/pt/854291468227637758/pdf/593580REVISI ON00Box369273B008723932.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2017.
- TATRALLYAY, N.; STADELMANN, M. **Climate change mitigation and international finance: the effectiveness of the Clean Development Mechanism and the Global Environment Facility in India and Brazil**. Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change, Vol.18, pp. 903–919, 2013.
- UNFCCC [a]: UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **KP Introduction**. 2018. Disponível em: <<https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol>>. Acesso em: 16 mai. 2018
- UNFCCC [b]: UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Nationally Determined Contributions (NDCs)**. 2017. Disponível em: <unfccc.int/focus/items/10240.php>. Acesso em: 17 mai. 2018.
- UNITED NATIONS. **International Standard Industrial Classification of All Economic Activities (ISIC), Rev. 4**. Department of Economic and Social Affairs. Statistics Division. New York, 2008. Disponível em: <<https://unstats.un.org/unsd/cr/registry/regdntransfer.asp?f=135>>. Acesso em: 21 dez. 2017.
- UNITED STATES BUREAU OF LABOR AND STATISTICS. **Databases, Tables & Calculators by Subject: Consumer Price Index - All Urban Consumers. Bureau of Labor Statistics**. Disponível em: <<http://www.bls.gov/data/>>. Acesso em: 02 out. 2014.
- USGS: United States Geological Survey. **Mineral commodity summaries 2014: U.S. Geological Survey**. 196 p. 2014. Disponível em <<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2018.
- VAN VUUREN, D. P.; DE VRIES, B.; KRAM, T. **Responses to technology and taxes in a simulated world**. Energy Economics. Volume 26, Issue 4, Pages 579-601. July, 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988304000386>>. Acesso em: 10 mai. 2018.
- VOGT-SCHILB, A.; HALLEGATTE, S. **Marginal abatement cost curves and the optimal timing of mitigation measures**. Energy Policy, Vol. 66, pp. 645–653, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142151301152X>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

VOGT-SCHILB, A.; HALLEGATTE, S.; DE GOUVELLO, C. **Long-Term Mitigation Strategies and Marginal Abatement Cost Curves: A Case Study on Brazil**. The World Bank. Sustainable Development Network Office of the Chief Economist & Latin America and Caribbean Region Energy Sector Unit. March, 2014. Disponível em <<http://elibrary.worldbank.org/doi/pdf/10.1596/1813-9450-6808>>. Acesso em: 21 fev. 2017.

WÄCHTER, P. **The usefulness of marginal CO₂e abatement cost curves in Austria**. Energy Policy 61, pp1116–1126. Vienna: Austria. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513006320>>. Acesso em: 3 mar. 2017.

WANG, K.; WANG, C.; LU, X.; CHEN, J. **Scenario analysis on CO₂ emissions reduction potential in China's iron and steel industry**. Energy Policy, Vol. 35, n. 4, pp. 2320–2335, 2007.

WARNER, E.; HEATH, G. **Life cycle greenhouse gas emissions of nuclear electricity generation: Systematic review and harmonization**. Journal of Industrial Ecology. Vol 16, n S1, pp. S73-S92, 2012.

WETZELAER, B. J. H. W.; VAN DER LINDEN, N. H.; GROENENBERG, H.; DE CONINCK, H. C. **GHG Marginal Abatement Cost curves for the Non-Annex I region**. 2007. Disponível em: <<https://www.ecn.nl/publicaties/PdfFetch.aspx?nr=ECN-E--06-060>>. Acesso em: 30 mar. 2017.

WHITAKER, M.; HEATH, G. A.; O'DONOUGHUE, P.; VORUM, M. **Life cycle greenhouse gas emissions of coal-fired electricity generation: Systematic review and harmonization**. Journal of Industrial Ecology. Vol. 16. n. S1. 2012.

WILSON, C.; GRUBLER, A.; BAUER, N.; KREY, V.; RIAHI, K. **Future capacity growth of energy technologies: are scenarios consistent with historical evidence?** Climatic Change 118 (2), 381–395. 2013. Disponível em <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-012-0618-y>>. Acesso em 13 mai. 2018.

WORREL, E.; MARTIN, N., PRICE, L. **Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U.S. Iron and Steel Sector**. Energy. Volume 26, Issue 5, May 2001, Pages 513-536. May, 2001. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544201000172?via%3Dihub>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

WORRELL, E.; PRICE, L.; MARTIN, N. **Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the US iron and steel sector**. Energy, Vol. 26, n. 5, pp. 513-536, May, 2001. Disponível em: <www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544201000172?via%3Dihub>. Acesso em: 26 dez. 2017.

WORRELL, E.; MARTIN, N.; PRICE, L. **Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry.** Energy, Vol: 25, pp. 1189-1214, 2000.

Disponível em

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544200000426?via%3Dihub>>.

Acesso em: 19 mai. 2017.

ZHOU, P.; ZHANG, L.; ZHOU, D. Q.; XIA, W. J. **Modeling economic performance of interprovincial CO₂ emission reduction quota trading in China.** Applied Energy, Vol. 112, pp.1518 -1528, 2013.

APÊNDICE 1 - Relações criadas entre tabelas no Access® (*re-MACC*)

Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE 2 - Listagem de tabelas e consultas criadas no *re-MACC*

Lista de Tabelas
PAÍS: lista de países utilizados;
CPI: índices de preço ao consumidor, separados por ano;
MOEDA: lista de moedas utilizadas e suas respectivas taxas de câmbio;
FE_EL: fatores de emissão calculados, conforme ano e país;
FE_EL_BR: fatores de emissão da eletricidade para o Brasil, separados por ano;
FE_TPES: fatores de emissão relacionados à energia primária (calor), conforme ano e país;
FE_TPES_BR: fatores de emissão relacionados à energia primária (calor) para o Brasil, conforme ano;
ISIC_Rev_4: lista de atividades econômicas do ISIC, revisão número 4;
PERDAS_EL: perdas na transmissão de eletricidade, conforme ano e país;
PERDAS_EL_BR: perdas na transmissão de eletricidade no Brasil, conforme ano;
TECNOLOGIA: lista de tecnologias de baixo carbono, com seus respectivos potenciais de redução de emissão e custos marginais de abatimento, períodos de análise, moeda utilizada, fonte de dados, tipo de tecnologia, fatores de harmonização, etc.;
REFERÊNCIAS: lista de referências bibliográficas utilizadas (autores, DOI, ano de publicação, páginas, etc);
TIPO: tipo de tecnologia (C ou E);
PROD_FIS: indicador relacionado à produção industrial, conforme ano e país;
PROD_FIS_BR: indicador relacionado à produção industrial das indústrias brasileiras, conforme ano;
ANO: anos utilizados;
ANO_MOEDA: anos das moedas utilizadas.
Lista de Consultas
CUSTO: custos marginais de abatimento das tecnologias de baixo carbono, harmonizados para o Brasil, ano de 2014;
EMISSIONES-TIPO C: emissões harmonizadas das tecnologias de baixo carbono do tipo C para o Brasil no ano de 2014;
EMISSIONES-TYPE E: emissões harmonizadas das tecnologias de baixo carbono do tipo E para o Brasil no ano de 2014.

APÊNDICE 3 - Tecnologias de baixo carbono harmonizadas para o Brasil, para o ano de 2014

Código ^a	Tecnologia	Potencial de redução de emissões (MtCO ₂ e)	Custo marginal de abatimento (US\$/tCO ₂ e)	Tipo ^d	ISIC ^{b,c}
36	Establish energy management center	0,2944392	-145,996158	C	2410
37	Powder coal injection (PCI)	0,203708306	-132,479534	C	2410
1	Adjustable speed drive for kiln fan	0,007750485	-79,450704	E	2394
2	Replacement of separator in coal mill circuit with an efficient grit separator	0,003325879	-78,706056	E	2394
3	Replacement of cement mill vent fan	0,000178172	-74,35688	E	2394
6	High-efficiency motors	0,056391461	-73,70936	E	2394
7	Variable frequency drive (VFD) in raw mill vent fan	0,005315467	-73,310056	E	2394
8	High-efficiency fan for raw mill vent fan with inverter	0,00044543	-70,74156	E	2394
10	Bucket elevator for raw meal transport from raw mill to homogenizing silos	0,00299923	-69,8782	E	2394
11	Replacement of preheater fan with high-efficiency fan	0,00089086	-69,856616	E	2394
12	VFD in cooler fan of grate cooler	0,004068262	-67,762968	E	2394
13	Energy management and process control in grinding	0,109071005	-63,392208	E	2394
14	Adjustable speed drives	0,112693837	-61,320144	E	2394
15	Efficient vertical roller mill for coal grinding	0,015471275	-59,701344	E	2394
16	Installation of variable frequency drive and replacement of coal mill bag dust collector's fan	0,004305825	-58,298384	E	2394
38	Advanced continuous casting technology	0,180589376	-53,59563	C	2410
95	Secondary steelmaking: Improved process control (neural network)	0,084454683	-47,39151	E	2410
17	Bucket elevators for kiln feed	0,001573853	-39,703768	E	2394
18	Replacing a ball mill with vertical roller mill	0,565310296	-38,052592	E	2394
56	Cement: Improved Efficiency	0,007726589	-36,6135	C	2394
19	Preventative maintenance	0,083236054	-35,354592	E	2394
20	Raw meal process control (vertical roller mill)	0,029101439	-35,311424	E	2394
21	High pressure roller press as pre-grinding to ball mill	0,297309801	-35,084792	E	2394
100	Secondary steelmaking: Oxy-fuel burners	0,031263255	-34,599285	E	2410
22	Efficient kiln drives	0,003236793	-29,764336	E	2394

48	Cutting ratio of iron/steel in steel & iron industry	0,414395911	-25,9008	C	24 10
23	Low temperature waste heat recovery for power generation	0,863184308	-24,940312	E	23 94
24	Kiln shell heat loss reduction	1,740725019	-21,324992	C	23 94
25	Use of alternative fuel (biomass)	0,411888336	-20,699056	C	23 94
26	Energy management and process control systems for clinker making step	0,710031315	-18,389568	C	23 94
27	Modification of clinker cooler (use of mechanical flow regulator)	0,119773926	-17,86076	C	23 94
77	Integrated steelmaking: Adopt continuous casting	0,090788887	-17,828745	C	24 10
104	Secondary steelmaking: Scrap preheating, post combustion — shaft furnace (FUCHS)	0,037535414	-17,22597	E	24 10
28	Portland limestone cement	0,500339227	-15,518896	C	23 94
29	Optimize heat recovery/upgrade clinker cooler	0,111544452	-14,94692	C	23 94
30	Blended cement	2,748197574	-13,910888	C	23 94
51	Renovation of kilns for wet cement production	0,575792213	-13,81376	C	23 94
52	Cement (innovation of wet process kilns)	0,013086187	-13,38208	C	23 94
53	Cement (dry kilns replacing wet kilns)	0,013086187	-11,00784	C	23 94
98	Secondary steelmaking: Bottom stirring/stirring gas injection	0,006867186	-5,532135	E	24 10
49	Pulverized coal injection into blast furnace	0,013086187	-5,28808	C	24 10
50	Continuous casting of steel making	0,335878791	-4,10096	C	24 10
103	Secondary steelmaking: Scrap preheating — Tunnel furnace (CONSTEEL)	0,037496396	-2,960295	E	24 10
69	Integrated steelmaking: Injection of natural gas to 140 kg/thm	0,074541387	-2,4111	C	24 10
102	Secondary steelmaking: DC-Arc furnace	0,011139668	-2,129805	E	24 10
31	Upgrading the preheater from 4 stages to 5 stages or from 5 stages to 6 stages	1,203608339	-1,478504	C	23 94
157	Use of waste fuels (w)	0,057079562	0	C	23 94
57	Cement: New Technologies	0	0	C	23 94
54	Cement: Fly Ash Substitution	0,022075969	0	C	23 94
60	Integrated steelmaking: Increasing bed depth	0,004034564	0	C	24 10
65	Integrated steelmaking: Variable speed drive coke oven gas compressors	9,3814E-05	0	C	24 10
109	Secondary steelmaking: Recuperative burners	0,130445857	0	C	24 10
158	Use of waste fuels (d)	0,067817302	0,287694	C	23 94
163	Conversion to grate cooler (d)	0,027126921	0,399575	C	23 94

154	Preventative maintenance	0,123766576	0,47949	C	23 94
162	Conversion to grate cooler (w)	0,009042307	0,47949	C	23 94
159	Conversion to semi-wet kiln	0,058774995	0,511456	C	23 94
165	Kiln combustion system (w)	0,006216586	0,527439	C	23 94
156	Kiln heat loss reduction (dry)	0,035038939	0,575388	C	23 94
145	Preventative maintenance	0,093670799	0,698985	C	23 94
144	Blended cement	2,936095044	0,698985	C	23 94
91	Integrated steelmaking: Preventative maintenance	0,304949541	0,77691	C	24 10
166	Kiln combustion system (d)	0,014128605	0,847099	C	23 94
146	Portland limestone cement	0,542644629	1,48673	C	23 94
155	Kiln heat loss reduction (wet)	0,032778363	2,029841	C	23 94
114	Secondary steelmaking: Preventative maintenance	0,079792019	2,1432	E	24 10
116	Preventative maintenance	0,092519291	2,41871	E	23 94
67	Integrated steelmaking: Pulverized coal injection to 130 kg/thm	0,255059968	2,46468	C	24 10
147	Kiln shell heat loss reduction	1,760365015	2,540755	C	23 94
62	Integrated steelmaking: Use of waste fuels in sinter plant	0,005869949	3,308565	C	24 10
161	Clinker cooler grate (d)	0,092118502	3,468311	C	23 94
117	Modification of inlet duct of grate cooler fan	0	3,716825	E	23 94
79	Integrated steelmaking: Thin slab casting	0,993659108	3,763995	C	24 10
74	Integrated steelmaking: Improved blast control systems	0,082777234	4,09887	C	24 10
172	Conversion to preheater kiln	0,147502632	4,235495	C	23 94
72	Integrated steelmaking: Hot blast stove automation	0,091962296	4,39356	C	24 10
169	Cogeneration (steam)	0,003956009	4,411308	C	23 94
148	Use of waste-derived fuels	0,416673554	4,81523	C	23 94
160	Clinker cooler grate (w)	0,035038939	4,842849	C	23 94
111	Secondary steelmaking: Controlling oxygen levels and VSDs on combustion air fans	0,034935801	5,960775	C	24 10
85	Integrated steelmaking: Controlling oxygen levels and VSDs on combustion air fans	0,053910516	5,960775	C	24 10
149	Optimize heat recovery/upgrade clinker cooler	0,109820937	6,03568	C	23 94
83	Integrated steelmaking: Recuperative burners	0,045748874	6,067935	C	24 10

68	Integrated steelmaking: Pulverized coal injection to 225 kg/thm	0,070772441	6,48318	C	24 10
150	Use of steel slag in kiln (CemStar)	0,50065427	6,823425	C	23 94
39	Advanced blast furnace technology	1,505347673	7,243027	C	24 10
173	Conversion to precalciner kiln	0,191018734	7,575942	C	23 94
171	Precalciner on preheater kiln	0,118680278	7,9915	C	23 94
105	Secondary steelmaking: Twin Shell DC w/scrap preheating	0,005930752	7,996815	E	24 10
92	Integrated steelmaking: Energy monitoring and management system	0,081403368	8,452245	C	24 10
90	Integrated steelmaking: Automated monitoring and targeting system	0,047459435	8,559405	E	24 10
107	Secondary steelmaking: Thin slab casting	0,234673635	10,28736	C	24 10
40	Dry coke quenching	0,361178752	10,913012	C	24 10
167	Process control system	0,20401705	11,220066	C	23 94
61	Integrated steelmaking: Improved process control	0,002051473	11,452725	C	24 10
78	Integrated steelmaking: Efficient ladle preheating	0,006344648	11,774205	C	24 10
151	Energy management and process control systems in clinker making process	0,717066116	13,38057	C	23 94
41	Advanced coke oven	0,541768128	13,738208	C	24 10
82	Integrated steelmaking: Process control in hot strip mill	0,067616071	13,74327	C	24 10
152	Modification of clinker cooler (use of mechanical flow regulator)	0,119511019	15,39986	C	23 94
168	Variable speed drives	0,016302828	15,983	E	23 94
164	High efficiency motors	0,019019966	16,446507	E	23 94
108	Secondary steelmaking: Process control in hot strip mill	0,05588313	17,54745	C	24 10
112	Secondary steelmaking: Energy-efficient drives in the rolling mill	0,00331681	18,364545	E	24 10
86	Integrated steelmaking: Energy efficient drives (rolling mill)	0,005118273	18,364545	E	24 10
71	Integrated steelmaking: Recovery of blast furnace gas	0,016415856	20,722065	C	24 10
118	Adjustable speed drive for kiln fan	0,009570961	21,36897	E	23 94
115	Secondary steelmaking: Energy monitoring and management system	0,019899232	22,34286	E	24 10
58	Integrated steelmaking: Sinter plant heat	0,023318414	23,401065	C	24 10
106	Secondary steelmaking: Efficient ladle preheating	0,004898105	23,54841	C	24 10
32	High-efficiency classifiers	0,006414195	23,753192	E	23 94
119	Replacement of separator in coal mill circuit with an efficient grit separator	0,004147416	23,976295	E	23 94

170	Roller press/Horomill	0,037496505	24,342109	E	23 94
59	Integrated steelmaking: Reduction of air leakage	0,000820589	25,26297	C	24 10
64	Integrated steelmaking: Programmed heating	0,002908232	25,919325	C	24 10
81	Integrated steelmaking: Hot charging	0,043117495	29,884245	C	24 10
120	High efficiency fan for Primary Air fan along with inverter for speed control of the fan	0,000319032	31,032715	E	23 94
174	Wet to precalciner kiln conversion	0,570230481	31,854119	C	23 94
88	Integrated steelmaking: Heat recovery on the annealing line	0,024454071	35,054715	C	24 10
121	Replacement of cement mill vent fan	0,000319032	39,398345	E	23 94
122	High efficiency motors	0,071463176	41,62844	E	23 94
123	Variable frequency drive (VFD) in raw mill vent fan	0,006699673	43,11517	E	23 94
96	Secondary steelmaking: Flue gas monitoring and control	0,023410861	44,806275	E	24 10
97	Secondary steelmaking: Transformer efficiency — UHP transformers	0,021225848	48,03447	E	24 10
33	High-efficiency vertical roller mill for raw material grinding	0,059301605	51,078536	E	23 94
124	High efficiency fan for Raw Mill vent fan with inverter	0,000638064	52,03555	E	23 94
126	Replacement of preheater fan with a high efficiency fan	0,000957096	55,197625	E	23 94
125	Bucket elevator for raw meal transport from raw mill to homogenizing silos	0,003828384	55,197625	E	23 94
175	Pre-grinding-HP roller mill	0,010325125	57,954358	E	23 94
127	Installation of vortex finder vanes on top stage cyclones for reduction in differential pressure	0,029669979	62,44266	E	23 94
128	Variable Frequency drives (VFD) in cooler fan of grate cooler	0,005104513	62,631275	E	23 94
99	Secondary steelmaking: Foamy slag practice	0,019665124	63,84057	E	24 10
42	Adjust ratio of iron/steel	1,445151215	66,19822	C	24 10
153	Upgrading the preheater from 5 stages to 6 stages	1,201570249	68,50053	C	23 94
93	Integrated steelmaking: Cogeneration	0,674070868	77,39631	E	24 10
101	Secondary steelmaking: Eccentric Bottom Tapping (EBT) on existing furnace	0,024347296	79,59309	E	24 10
129	Adjustable speed drives	0,142607321	85,29836	E	23 94
130	Energy management & process control in finish grinding	0,134950552	87,71707	E	23 94
70	Integrated steelmaking: Top pressure recovery turbines (wet type)	0,023033288	94,05969	E	24 10
43	Advanced sinter machine	0,511669899	95,41961	C	24 10

131	Installation of VFD & replacement of coal mill Bag Dust Collector's fan	0,005423545	95,894085	E	23 94
89	Integrated steelmaking: Reduced steam use (pickling line)	0,022214687	101,18583	C	24 10
132	Optimization of the diameter of preheater's exit gas downcomer duct	0,000957096	106,678425	E	23 94
73	Integrated steelmaking: Recuperator hot blast stove	0,033222566	121,6266	C	24 10
179	Low pressured drop cyclones	0,005977704	123,340811	E	23 94
44	Advanced direct steel rolling machine	0,083751595	127,881666	C	24 10
87	Integrated steelmaking: Waste heat recovery (cooling water)	0,008663898	130,400325	C	24 10
55	Cement: Fuel Switching	0,020236305	132,0305	C	23 94
133	Low temperature waste heat recovery for power generation	1,069076356	133,439565	E	23 94
176	Improved grinding media	0,003260566	140,986043	E	23 94
110	Secondary steelmaking: Insulation of furnaces	0,010188871	153,895155	C	24 10
84	Integrated steelmaking: Insulation of furnaces	0,015640874	154,698855	C	24 10
34	Efficient transport system (mechanical transport instead of pneumatic transport)	0,003949481	156,64588	E	23 94
134	Bucket elevators for kiln feed	0,001914192	161,49882	E	23 94
135	Replacing a ball mill with vertical roller mill for finish grinding	0,706974994	164,838415	E	23 94
76	Integrated steelmaking: Variable speed drive on ventilation fans	0,004383258	169,352985	C	24 10
136	High pressure roller press as pre-grinding to ball mill for finish grinding	0,371672323	175,068005	E	23 94
137	Raw meal process control (Vertical mill)	0,036369652	176,92087	E	23 94
94	Integrated steelmaking: Variable speed drive, flue gas control, pumps, fans	0,006021178	191,240415	E	24 10
45	Advanced converter	0,46761307	193,262795	C	24 10
113	Secondary steelmaking: Waste heat recovery from cooling water	0,007160512	195,607185	C	24 10
138	Efficient kiln drives	0,004147416	196,436975	E	23 94
180	High efficiency classifiers (w)	0,007607986	206,052836	E	23 94
75	Integrated steelmaking: BOF gas+sensible heat recovery	0,392927796	208,07793	C	24 10
139	Installation 3-fan system with a separate mill fan to take care of vertical roller mill operation	0,003509352	237,133435	E	23 94
35	Use of gravity system instead of pneumatic system in raw meal blending	0,071031267	265,86092	E	23 94
46	Smelt reduction technology	0,349401184	323,457244	C	24 10
177	High efficiency classifiers (d)	0,023910815	327,299874	E	23 94
181	Mechanical transport systems (d)	0,004890848	331,615284	E	23 94

140	High-efficiency classifiers (for raw mill)	0,007975801	384,874455	E	23 94
178	High efficiency roller mill	0,06358103	439,804211	E	23 94
47	Advanced EAF	0,060245773	465,617229	E	24 10
141	High efficiency roller mill	0,074015433	481,14577	E	23 94
182	Mechanical transport systems (w)	0,004890848	663,230568	E	23 94
142	Efficient transport system	0,004785481	853,016885	E	23 94
66	Integrated steelmaking: Coke dry quenching	0,021108135	1068,130695	C	24 10
143	Raw meal blending	0,088690906	1237,702725	E	23 94
63	Integrated steelmaking: Coal moisture control	0,005159766	3158,13915	C	24 10

Legenda:

a: estes códigos fazem referência aos códigos do *re-MACC*.

b: 2410-Manufacture of basic iron and steel; 2394-Manufacture of cement, lime and plaster.

c: Versão ISIC rev. 4.

d: tecnologia referentes ao Tipo Calor (C) ou Tipo Eletricidade (E).

APÊNDICE 4 - Tecnologias utilizados para geração da MACC, no caso Brasil, para o ano de 2014

Código ^a	Tecnologia ^d	Código ISIC ^{b,c}	Custo Marginal de Abatimento (US\$/tCO ₂ e)	Potencial de Abatimento (MtCO ₂ e)
36	Estabelecimento do centro de gerenciamento de energia [C-SID]	2410	-145,09	0,2194
37	Injeção de carvão em pó (<i>PCI</i>) [C-SID]	2410	-68,49	0,0808
95	Siderúrgicas secundárias: melhor controle de processo (rede neural) [E-SID]	2410	-47,35	0,0659
56	Melhoria da eficiência [C-CIM]	2394	-36,33	0,01
100	Siderúrgicas secundárias: queimadores de oxigênio [E-SID]	2410	-34,57	0,0244
1	Unidade de velocidade ajustável para o ventilador do forno [E-CIM]	2394	-29,4	0,0081
38	Tecnologia avançada de fundição contínua [C-SID]	2410	-28,7	0,1924
2	Substituição do separador no circuito do moinho de carvão por um eficiente separador de grãos [E-CIM]	2394	-27,73	0,0035
25	Uso de combustível alternativo (biomassa) [C-CIM]	2394	-20,84	0,4187
3	Substituição do ventilador do moinho de cimento [E-CIM]	2394	-17,89	0,0002
77	Fabricação de aço integrada: adoção de fundição contínua [C-SID]	2410	-17,81	0,1118
104	Siderúrgicas secundárias: pré-aquecimento de sucata, pós combustão - forno de eixo (<i>FUCHS</i>) [E-SID]	2410	-17,21	0,0293
116	Manutenção preventiva [E-CIM]	2394	-16,6	0,082
7	Unidade de frequência variável (<i>VFD</i>) no ventilador do moinho [E-CIM]	2394	-15,52	0,0056
51	Renovação de fornos para produção de cimento úmido [C-CIM]	2394	-13,91	0,429
52	Inovação de fornos de processo úmido [C-CIM]	2394	-13,47	0,0097

53	Substituição de fornos molhados por secos [C-CIM]	2394	-11,08	0,0097
98	Siderúrgicas secundárias: agitação de fundo (<i>bottom stirring</i>) / injeção de gás com agitação [E-SID]	2410	-5,53	0,0054
103	Siderúrgicas secundárias: pré-aquecimento de sucata - forno de túnel (<i>CONSTEEL</i>) [E-SID]	2410	-2,96	0,0293
69	Fabricação de aço integrada: injeção de gás natural a 140 kg/thm [C-SID]	2410	-2,41	0,0918

Legenda:

a: estes códigos fazem referência aos códigos do *re-MACC*.

b: 2410-Manufacture of basic iron and steel; 2394-Manufacture of cement, lime and plaster.

c: versão ISIC rev. 4.

d: as letras entre colchetes referem-se às tecnologias do tipo C (calor) ou E (eletricidade), sendo relacionadas ao subsetor de cimento (CIM) ou siderurgia (SID).

APÊNDICE 5 - MACC para o Brasil, no ano de 2014 (cimento e siderurgia)

Código^a Tecnologia^b

- 36 Estabelecimento do centro de gerenciamento de energia [C-SID]
- 37 Injeção de carvão em pó (*PCI*) [C-SID]
- 95 Siderúrgicas secundárias: melhor controle de processo (rede neural) [E-SID]
- 56 Melhoria da eficiência [C-CIM]
- 100 Siderúrgicas secundárias: queimadores de oxigênio [E-SID]
- 1 Unidade de velocidade ajustável para o ventilador do forno [E-CIM]
- 38 Tecnologia avançada de fundição contínua [C-SID]
- 2 Substituição do separador no circuito do moinho de carvão por um eficiente separador de grãos [E-CIM]
- 25 Uso de combustível alternativo (biomassa) [C-CIM]
- 3 Substituição do ventilador do moinho de cimento [E-CIM]
- 77 Fabricação de aço integrada: adoção de fundição contínua [C-SID]
- 104 Siderúrgicas secundárias: pré-aquecimento de sucata, pós combustão - forno de eixo (*FUCHS*) [E-SID]
- 116 Manutenção preventiva [E-CIM]
- 7 Unidade de frequência variável (*VFD*) no ventilador do moinho [E-CIM]
- 51 Renovação de fornos para produção de cimento úmido [C-CIM]
- 52 Inovação de fornos de processo úmido [C-CIM]
- 53 Substituição de fornos molhados por secos [C-CIM]
- 98 Siderúrgicas secundárias: agitação de fundo (*bottom stirring*) / injeção de gás com agitação [E-SID]
- 103 Siderúrgicas secundárias: pré-aquecimento de sucata - forno de túnel (*CONSTEEL*) [E-SID]
- 69 Fabricação de aço integrada: injeção de gás natural a 140 kg/thm [C-SID]

Legenda:

a: estes códigos fazem referência aos códigos do *re-MACC*.

b: as letras entre colchetes referem-se às tecnologias do tipo C (calor) ou E (eletricidade), sendo relacionadas ao subsetor de cimento (CIM) ou siderurgia (SID).