



METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DO CUSTO MARGINAL DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA DESCARBONIZAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Methodologies for evaluating the marginal cost of reducing greenhouse gas emissions in decarbonization: a systematic review

Metodologías para evaluar el coste marginal de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la descarbonización: una revisión sistemática

Thiago Senatore Morila¹ & Neyval Costa Reis Junior²

^{1,2}Universidade Federal do Espírito Santo, Núcleo de Pesquisa em Qualidade do Ar

¹sep_thiago7@hotmail.com²neyval@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido: 27.05.2025

Aprovado: 30.08.2025

Disponibilizado: 08.09.2025

PALAVRAS-CHAVE: Curvas de Custo Marginal de Abatimento, MAC, Mitigação de Gases de Efeito Estufa.

KEYWORDS: Marginal Abatement Cost Curves, MAC, Greenhouse Gas Mitigation.

PALABRAS CLAVE: Curvas de Costo Marginal de Abatimiento, CMA, Mitigación de Gases de Efecto Invernadero.

*Autor Correspondente: Morila, T. S.

RESUMO

Trata-se de uma revisão das metodologias que utilizam o custo marginal de abatimento (MAC) de emissões de gases de efeito estufa, o objetivo é identificar os tipos de abordagens disponíveis, suas vantagens, desvantagens, em que casos são utilizadas e qual a sua complexidade (tanto computacional como obtenção de dados). Os resultados da pesquisa foram encontrados e explicados seis tipos principais de modelos: abordagens baseadas em especialistas, modelos de engenharia, funções de distância, modelos de equilíbrio geral computável, modelos de avaliação integrada e modelos híbridos em que todos utilizam curvas MAC para identificar medidas econômicas a mitigação da mudança climática e estabelecer caminhos de descarbonização. Além disso, é discutida a possibilidade de utilizar modelos híbridos que integrem diversas metodologias para uma avaliação mais completa, assim como as dificuldades de sua aplicação. A principal contribuição é não apenas trazer uma revisão sobre as metodologias, mas também comparar as e mostrar quais contextos cada uma é melhor aplicada buscando servir como um guia para futuras pesquisas e aplicações práticas na área de economia ambiental.

ABSTRACT

This is a review of methodologies that use the marginal abatement cost (MAC) of greenhouse gas emissions, with the aim of identifying the types of approaches available, their advantages, disadvantages, in which cases they are used and how complex they are (both computationally and in terms of obtaining data). The results of the research found and explained six main types of models: expert-based approaches, engineering models, distance functions, computable general equilibrium models, integrated assessment models and hybrid models in which all use MAC curves to identify economic measures to mitigate climate change and establish decarbonization pathways. In addition, the possibility of using hybrid models that integrate various methodologies for a more complete assessment is discussed, as well as the difficulties of applying them. The main contribution is not only to provide a review of the methodologies, but also to compare them and show in which contexts each one is best applied, seeking to serve as a guide for future research and practical applications in environmental economics.

RESUMEN

Se trata de una revisión de las metodologías que utilizan el coste marginal de reducción (MAC) de las emisiones de gases de efecto invernadero, con el objetivo de identificar los tipos de enfoques disponibles, sus ventajas, desventajas, en qué casos se utilizan y su complejidad (tanto computacional como de obtención de datos). Los resultados de la investigación encuentran y explican seis tipos principales de modelos: enfoques basados en expertos, modelos de ingeniería, funciones de distancia, modelos de equilibrio general computable, modelos de evaluación integrada y modelos híbridos en los que todos ellos utilizan curvas MAC para identificar medidas económicas para mitigar el cambio climático y establecer vías de descarbonización. También se analiza la posibilidad de utilizar modelos híbridos que integren varias metodologías para una evaluación más completa, así como las dificultades de su aplicación. La principal aportación no es sólo ofrecer una revisión de las metodologías, sino también compararlas y mostrar en qué contextos se aplica mejor cada una, buscando servir de guía para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el área de la economía ambiental.



INTRODUÇÃO

Já é clara e evidente segundo diversos estudos assim como o sexto relatório do IPCC (2023) que as atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento, a agricultura intensiva e a produção industrial, contribuíram para o aumento das concentrações de poluentes na atmosfera, acelerando o aquecimento global. Para evitar os efeitos existem duas possibilidades: a adaptação, que é já se preparar para o que vai acontecer e a mitigação que é reduzir os causadores do aquecimento global para evitar que ele ocorra no futuro. Em ambos os casos para implementar as medidas é preciso conhecer os fatores que causam o aumento da temperatura para definir planos de ação, que devem ser feitos o mais rápido possível pois os efeitos já são vistos sejam por ondas de calor ou no aumento de eventos de extremos em relação a chuvas tanto com secas ou com enchentes devido ao aumento da temperatura global (Kikstra et al., 2022).

Nesse contexto existem diversos estudos com o propósito de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e atenuar os impactos das mudanças climáticas. Por se tratar de um problema amplo existem muitas áreas e metodologias tratando do assunto, sendo algumas delas tratadas a seguir: Uma área de estudo é a transição para fontes de energia renovável, como solar, eólica, hidrelétrica e biomassa, que representam alternativas mais limpas e sustentáveis em relação aos combustíveis fósseis (Pietzcker et al., 2021). Outro foco é o esforço voltado para a melhoria da eficiência energética, exemplificado pelos estudos de Babacan et al. (2020) e De Souza et al. (2018). Com foco na eficiência energética buscam reduzir o consumo de energia e otimizar a utilização de recursos, tanto em ambientes residenciais, comerciais e industriais quanto em processos produtivos, fator que reduz emissões de GEE associadas à produção de energia. Fato que não é apenas no setor energético, no setor agrícola observa-se uma crescente pesquisa em práticas agrícolas sustentáveis, como agricultura de conservação, agroecologia e manejo integrado de culturas buscando reduzir as emissões de metano e óxido nitroso provenientes da atividade agrícola, tendo a vantagem que de promover a captura de carbono no solo (Zhang et al., 2020).

Os estudos permitem que sejam feitas rotas de descarbonização em que ações são tomadas buscando diminuir a poluição, para isso as rotas podem ser definidas a partir do custo necessário para cada medida de mitigação. Esses custos variam de acordo com as estratégias adotadas e as tecnologias empregadas em cada rota de descarbonização. É importante observar que diferentes caminhos rumo ao carbono zero têm estruturas de custo distintas que são determinadas por suas características exclusivas. Por exemplo, Shihui Zhang et al. (2021) consideram duas rotas distintas de descarbonização: uma que prioriza a transição para energias renováveis, como a solar e a eólica, e outra que se concentra na captura e no armazenamento de carbono (CCS). A primeira rota depende de investimentos em infraestrutura para geração de energia renovável, como painéis solares e turbinas eólicas, bem como sistemas de armazenamento de energia e da integração dessas fontes intermitentes à rede elétrica. Já a rota de descarbonização baseada no CCS exige investimentos em tecnologias de captura de carbono, como sistemas de absorção e separação de CO₂, e infraestrutura para transporte e armazenamento seguros do carbono capturado. (Eory et al., 2018; Drouet et al., 2021; Shihui Zhang et al., 2021; Wills et al., 2021).

Para isso deve ser levado em conta os custos de implementação, operação e manutenção das políticas, bem como a avaliação dos custos de oportunidade associados à transição para uma economia de baixo carbono. Sem falar que estratégias por exemplo de eficiência energética podem gerar benefícios financeiros, assim como estratégias de energia renovável podem gerar benefícios à saúde. Para isso existem as curvas *MAC* (*Marginal Abatement Cost Curves*) que são ferramentas cruciais na identificação das opções mais eficientes em termos de custo para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, auxiliando na consecução das metas de redução de emissões (Huang et al., 2016).

Na economia ambiental, os *MACs* (custos marginais de abatimento) referem-se aos custos necessários para alcançar uma redução adicional de emissões por unidade (McKittrick, 1999). Para isso são definidos um cenário de referência em que medidas não são aplicadas e um em que são feitas ações de mitigação, são então comparados os custos das ações assim como os efeitos gerados na produção. Após definir os custos de cada ação assim como a quantidade de GEE mitigada as ações são ordenadas pelo custo para cada tonelada de GEE mitigada, do menor custo para o maior. Em alguns casos, as primeiras medidas podem até apresentar custos negativos devido a melhorias na eficiência dos processos, resultando em lucros que são representados como custos negativos (Lameh et al., 2021).

Ao incorporar as Curvas *MAC* em um plano de descarbonização, os formuladores de políticas podem identificar as medidas de redução de emissões que oferecem o maior potencial de abatimento a um custo mais baixo. Já que existem diversos caminhos para seguir, mas não existe uma disponibilidade e capacidade de fazer todas as medidas que existem, uma maneira de definir quais ações devem ser priorizadas é analisar as Curvas *MAC*, inclusive é possível definir a prioridade pelas medidas que têm menores custos e são mais fáceis de implementar assim como também as que possuem o maior efeito na redução de emissões, sendo feito uma mescla entre as melhores reduções e os menores custos (Yue et al., 2020).

Nesse sentido, este artigo busca fazer uma revisão sobre os estudos que utilizam *MAC*, buscando entender quais as metodologias utilizadas, suas respectivas vantagens, desvantagens, aplicações assim como fatores mais técnicos como os dados necessários e a complexidade dos modelos. Buscando facilitar quem busca realizar estudos nesse caminho a escolher sua metodologia.

Quando se fala na metodologia que utilizam curvas *MAC* é possível separar em duas premissas, *top down* e *bottom up*. Os modelos *top-down* são usados para estimar os custos de redução de emissões em nível macroeconômico, são mais utilizados em nível nacional ou regional. Para isso os dados são mais agregados e possuem menos detalhes, sendo encontrados por meio suposições econômicas para estimar os custos da redução de emissões, em vez de se concentrarem nos detalhes técnicos de tecnologias ou empresas individuais, sendo os dois principais modelos a função distância e o CGE (*Computable General Equilibrium*) (Tao et al., 2021).

Os modelos *bottom up* podem ser separados em modelos baseados em especialistas e em modelos de engenharia são usados para estimar os custos da redução de emissões em nível microeconômico, como no nível de empresas ou tecnologias individuais, e por isso requerem mais dados técnicos e cálculos matemáticos para estimar os custos da redução de emissões,

em vez de se concentrarem nos impactos econômicos mais amplos das políticas de mitigação da mudança climática, por exemplo por estudar uma indústria específica não é capaz de prever se existe oferta de gás suficiente para substituir o carvão como combustível em um processo, será calculado apenas o custo dessa ação e a quantidade de GEE reduzida (Yang et al., 2022).

Existem ainda modelos que buscam trazer o melhor dos dois mundos, buscando trazer a maior riqueza de detalhes técnicos dos modelos *bottom up* aliados a suposições econômicas dos modelos *top down*. Às vezes algum setor não possui tanto detalhamento e pode ser necessário fazer generalizações. Nesse sentido existem os *IAM* (*Integrated Assessment Model*) que incluem módulos para sistemas de energia, uso da terra, agricultura, silvicultura e outros setores, e usam equações matemáticas para simular as interações entre esses diferentes sistemas. Sendo assim, cada setor pode utilizar a metodologia que melhor o descreva. Sendo depois todos agregados por um modelo econométrico (Babacan et al., 2020).

Além dos *IAMs*, os modelos híbridos são projetados para aproveitar os pontos fortes dos modelos *top-down* e *bottom-up*. Para isso podem rodar tanto um modelo de engenharia e depois agregar com o CGE para garantir que os dados sejam os mais técnicos possíveis, mas permitir que sejam feitas análises econômicas, como por exemplo uma taxa de carbono, cabe ressaltar que caso a intenção seja utilizar uma modelagem híbrida ainda assim é necessário conhecer os outros modelos para poder decidir quais utilizar combinados (Cole et al., 2021).

METODOLOGIA

Após a identificação do tema, o pesquisador definiu as palavras-chave (*keywords*) com base no tema e seus sinônimos. Para recolher a base de dados do *Scopus* e do *Web of Science* (WoS) foram selecionados os artigos com a *tag Topic* (TS), ou seja, procurar as palavras no título, resumo e nas palavras-chave por TS = ("abatement cost*" OR "reduction cost*" OR "mitigation cost*"). Sendo os dados obtidos em 28 de março de 2023 e para publicações a partir de 1 de janeiro de 2003. O tempo de 20 anos foi definido para garantir que publicações importantes e que podem ser consideradas como clássicos não fossem deixadas de lado. O resultado da busca foi então baixado para tratamento, contendo registro completo e referência citadas.

Foram encontrados 2.492 artigos no *Web of Science* e 3.636 no *Scopus*. Utilizando o *RStudio*, os dados foram cruzados e, retirando os duplicados, obteve-se um total de 3.974 artigos para análise utilizando a Equação (1) proposta por Pagani et al. (2015) e que recebeu modificações por Pagani et al. (2022) para melhor representar a ordem de importância dos artigos, sendo o processo de seleção e classificação de artigos descrito na Figura 1.

$$InOrdinatio = \Delta(IF \div 1000) - \lambda \times \left(\frac{AnoPes - AnoPub}{MeiaVidaCitado} \right) + \Omega \left(\frac{\Sigma Ci}{AnoPes + 1 - AnoPub} \right) \quad (1)$$

Onde,

IF é Fator de Impacto;

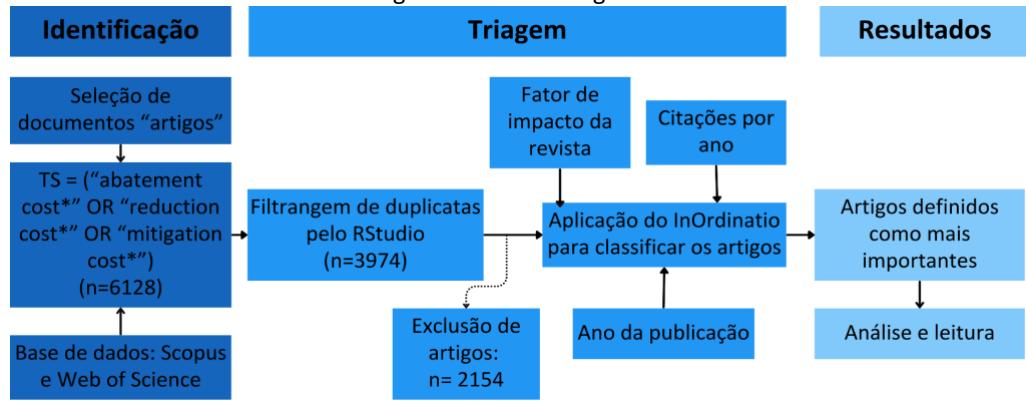
Δ , λ e Ω é o Fator de ponderação variando de 1 a 10, atribuído pelo pesquisador. Para problemas de engenharia, os pesos foram considerados os mesmos para ambos os fatores e definidos como 1; AnoPes representa o Ano em que a Pesquisa foi desenvolvida;

AnoPub o Ano em que a pesquisa foi publicada;

MeiaVidaCitado é a Mediana da Meia-vida de citação de revistas JCR (7,6). Utilizado por ser uma boa medida para descobrir se o material mais antigo ou mais recente está recebendo atenção (Clarivate 2017); e

ΣCi é a Quantidade de vezes que o artigo foi citado.

Figura 1. Estratégia para recuperação e classificação dos artigos relevantes para composição do banco de dados sobre metodologias de custos marginais de abatimento



Fonte: Autores (2025).

A partir da Equação (1) os artigos foram ordenados em ordem decrescente de *InOrdinatio* pelo processo descrito na Figura 1. Sendo assim classificados como os mais importantes na literatura, tanto pelo seu fator de impacto como as citações, além de uma variável referente ao ano para garantir que os mais recentes com menos citações não fossem ignorados. Os artigos foram lidos com foco em suas metodologias buscando encontrar quais existem e se podiam ser separadas em grupos específicos a partir de suas características.

RESULTADOS

Os resultados apresentados neste estudo são o fruto de uma análise das diversas metodologias existentes para a avaliação dos custos associados à mitigação das emissões de gases de efeito estufa. A pesquisa foi conduzida com base em uma revisão da literatura, que permitiu identificar e classificar as abordagens e suas aplicações em diferentes setores. A partir da coleta e análise dos dados, foram extraídas informações sobre as características tais como variáveis, complexidade, dados necessários para assim identificar as vantagens e desvantagens de cada metodologia, mas também revelam como essas abordagens podem ser integradas para formar modelos híbridos. Esses resultados estão apresentados resumidamente no Quadro 1, em que é apresentado o objetivo de cada metodologia assim como o tipo de custo que é levado em conta em cada abordagem, o que é essencial para informar os tomadores de decisão, pesquisadores e profissionais envolvidos na formulação de políticas climáticas.

A seguir, os resultados serão apresentados em subtemas que detalham as metodologias baseadas em especialistas (*EXPERT*), os modelos de engenharia (*ENG*), a função de distância (*DF*), o modelo de equilíbrio geral computável (*CGE*), os Modelos de Avaliação Integrada (*IAMs*) e os modelos híbridos, cada um contribuindo de maneira única para a compreensão do complexo panorama da descarbonização e suas implicações econômicas.

Quadro 1. Aplicações das metodologias quanto a tipo de custo e objetivo

Método	Objetivo	Tipo de custo
EXPERT	Determinar a relação custo-benefício das opções tecnológicas	Projetos de redução de emissões
ENG	Otimizar o portfólio de opções e minimizar os custos do sistema	Nível macro e no setor de energia
DF	Maximizar o lucro nos processos de produção considerando os efeitos negativos do carbono	Regionais ou setoriais
CGE	Maximizar os lucros das empresas e utilidade das residências a partir de taxas sobre o carbono	Nível macro taxas de carbono
IAM	Efeitos das ações de mitigação entre países ou em um país tanto do ponto de vista técnico como econômico	Nível setorial e global com taxas de carbono
Híbrido	Suprir lacunas de dados utilizando mescla de modelos para garantir representação de efeitos em regiões específicas do estudo	Nível setorial e macro com taxas de carbono

Fonte: Autores (2025)

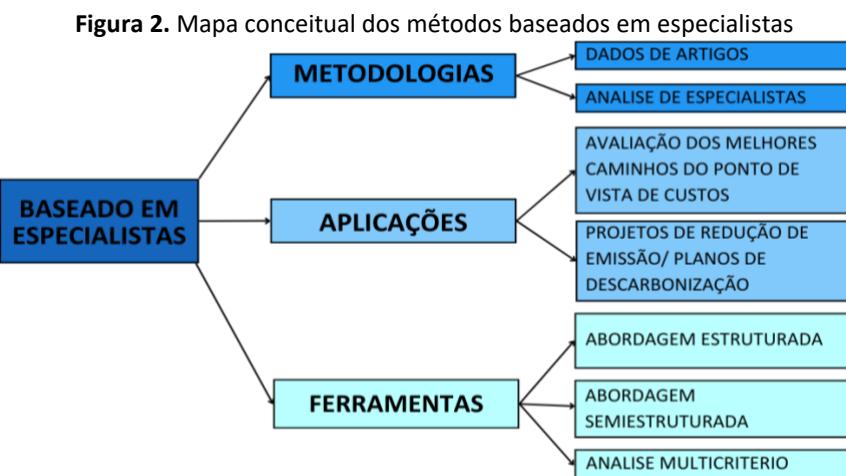


CC BY 4.0
DEED
Attribution 4.0
International

Métodos baseados em especialistas

A Figura 2 mostra um panorama das metodologias baseadas em *experts*, que dependem do conhecimento especializado e são frequentemente usadas para determinar a relação custo-benefício das opções tecnológicas. Elas são adequadas para estudar os custos de projetos de redução e geralmente são simples de calcular. Esses métodos envolvem especialistas que fornecem estimativas dos custos e benefícios de diferentes opções de redução com base em seu conhecimento e experiência.

A utilização de um banco de dados já consolidado, ou então fazer uma estimativa com base na literatura utilizando dados de outros artigos, também pode ser considerada uma abordagem baseada em *experts*, em que os artigos são os especialistas nesse caso. Como, por exemplo, o estudo de R. et al. (2015) que não calcularam as curvas MAC diretamente. Mas sim, revisaram e analisaram diversos estudos e relatórios sobre os custos de CCS para novas usinas de energia de combustíveis fósseis e usaram os dados desses estudos para estimar as curvas MAC. As curvas MAC foram estimadas traçando-se o custo da captura e do armazenamento de CO₂ em relação à quantidade de CO₂ abatida. O custo de captura e armazenamento de CO₂ foi estimado com base na faixa de custos relatada nos estudos revisados, e a quantidade de CO₂ abatida foi estimada com base nas taxas de captura de CO₂.



Fonte: Autores (2025).

O modelo de julgamento de especialistas desenvolvido por Sapkota et al. (2019) empregou uma avaliação conduzida por um especialista do National Dairy Research Institute da Índia. Este modelo seguiu as relações estabelecidas por Herrero et al. (2013) para estimar o peso, o consumo de alimentos e a produção per capita de carne e leite para diversas raças. Este método é aplicável em contextos em que os dados sobre emissões de GEE são limitados ou carecem de confiabilidade, ou ainda, quando há incertezas significativas nos dados disponíveis. Um painel de especialistas é solicitado a estimar as emissões de GEE com base em seu conhecimento dos processos e sistemas. Tais especialistas podem ser incumbidos de estimar as emissões de um setor específico, como agricultura ou transporte, ou de uma região ou país em particular.

Inicialmente, os especialistas são identificados com base em seu conhecimento, relevância e experiência na área. Um exemplo seria um representante de uma fábrica que já possui familiaridade com os insumos e poluentes da atividade. Os especialistas podem provir de ambientes de pesquisa, do setor privado ou do governo. Subsequentemente, os especialistas

recebem informações pertinentes aos processos, tais como dados sobre produtividade de safras, populações de animais ou consumo de energia. Em seguida, é solicitado aos especialistas que estimem as emissões de GEE utilizando uma abordagem estruturada ou semiestruturada (Van Vuuren et al., 2020).

A abordagem estruturada consiste em um conjunto de perguntas ou diretrizes que orientam os especialistas em seu processo de estimativa. Por exemplo, pode-se solicitar aos especialistas que estimem as emissões de diferentes subsetores, como fermentação entérica ou manejo de esterco no caso de emissões de gado. Adicionalmente, é possível solicitar que o especialista estabeleça as previsões futuras da metodologia em questão, por exemplo, se no primeiro ano não houver redução significativa, mas ao longo de um período de vida útil de 10 ou 20 anos, reduções maiores que as medidas com resultados mais rápidos sejam observadas.

A abordagem semiestruturada é mais flexível, permitindo que os especialistas utilizem seu próprio julgamento e experiência para estimar as emissões. Ela também possibilita a realização de estimativas em setores onde informações, como a energia necessária, não são conhecidas. Para tanto, os especialistas devem fornecer uma série de estimativas, acompanhadas de uma explicação das suposições e incertezas subjacentes às suas estimativas. Posteriormente, os resultados são agregados e analisados para desenvolver uma estimativa consensual das emissões de GEE. Os especialistas podem ser convidados a revisar e refinar suas estimativas com base no feedback de outros especialistas ou em informações adicionais que se tornem disponíveis (Pacca et al., 2018; Sapkota et al., 2019; Van Vuuren et al., 2020).

O modelo de avaliação de especialistas também apresenta limitações, como a possibilidade de viés ou subjetividade no processo de estimativa. Consequentemente, é imperativo empregar o modelo de avaliação de especialistas em conjunto com outros métodos de estimativa de emissões de GEE, como modelos orientados por dados ou técnicas de sensoriamento remoto (Bouman et al., 2017). Drout et al. (2015) empregaram a elição de especialistas sobre quantidades incertas, quando os dados são limitados ou indisponíveis, para estimar os parâmetros dos modelos climáticos utilizados na análise, como a sensibilidade climática e a taxa de absorção de calor do oceano. Concluem que, apesar das limitações dos critérios de tomada de decisão utilizados na análise, reconhecem que o julgamento de especialistas pode ser necessário em alguns casos para complementar os critérios. Por exemplo, observam que os critérios de tomada de decisão não consideram os possíveis riscos catastróficos associados à mudança climática, o que pode exigir a avaliação adicional de um especialista.

Yuan e Ng (2017) utilizaram o julgamento de especialistas para ajustar os potenciais de redução das medidas de mitigação de emissões e para selecionar as medidas mais viáveis de um conjunto maior de opções. As opiniões dos especialistas foram obtidas por meio de discussões com profissionais do setor. Subsequentemente, os mesmos autores, aplicaram um método de classificação multiobjetivo para hierarquizar as medidas de redução de emissões com base em dois objetivos: custo e redução. A medida com menor custo e maior volume de redução é a preferida. O método de classificação proposto neste documento oferece uma abordagem sistemática para quantificar incertezas e convertê-las em uma probabilidade de



preferência facilmente comprehensível, o que pode auxiliar os tomadores de decisão a fazer escolhas mais confiáveis sobre a seleção de medidas.

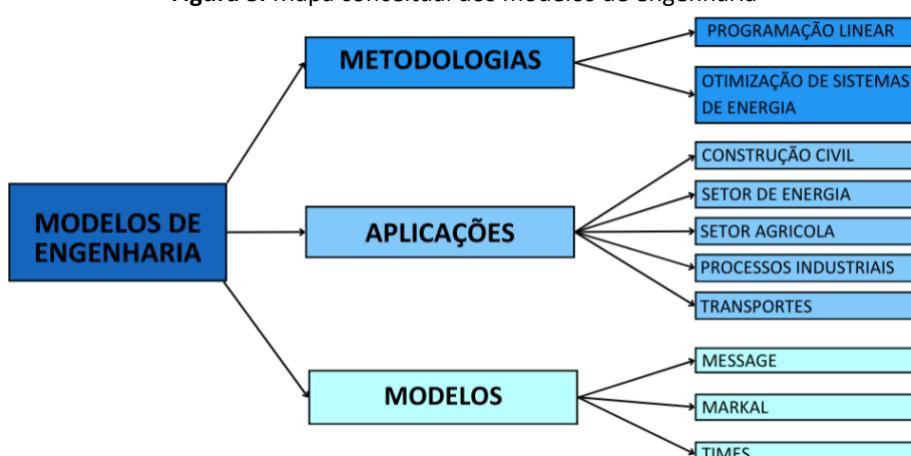
O método de especialistas também pode ser empregado a partir de uma análise multicritério, como no caso de Khaqqi et al. (2018), que ranqueou as medidas de mitigação com base na opinião de especialistas. Posteriormente, propuseram um sistema baseado em cadeias de blocos (blockchain) para a implementação do comércio de emissões. A partir do estudo de caso e com o peso das informações fornecidas pelos stakeholders, a Análise Multicritério (MCA) é utilizada para avaliar a eficácia do benefício do sistema em relação ao Esquema de Comércio de Emissões (Emission Trading Scheme - ETS) estabelecido. A MCA requer a identificação de opções de políticas, a seleção de critérios, a ponderação dos critérios e a avaliação das opções de políticas com base nos critérios. Os critérios empregados são o desempenho ambiental, a avaliação de custos, a viabilidade e a aceitabilidade. Ao ponderar para refletir sua importância relativa definida pelos especialistas, o modelo MCA avalia as opções de política em relação aos critérios e fornece uma classificação das opções de política com base em seu desempenho geral em relação aos critérios.

Diante do exposto, os métodos baseados em especialistas podem ser de grande utilidade, considerando que a própria revisão já implica a busca pela opinião de especialistas. Além disso, para alguns setores onde a coleta de dados é desafiadora, como indústrias que não divulgam certas informações ou na agricultura onde nem todas as medições existem, o auxílio de especialistas pode ser a única ferramenta disponível, podendo ser futuramente utilizada em conjunto com outros métodos para desenvolver um modelo híbrido mais abrangente.

Modelos de engenharia

São baseados em dados detalhados principalmente no setor de geração de energia e são frequentemente utilizados para otimizar portfólios de opções de redução e minimizar os custos do sistema, como o caso de Pietzcker et al. (2021) para a penetração de energia renovável no sistema elétrico ou de Kajaste et al. (2016) na produção de cimento. Os modelos de engenharia estão classificados na Figura 3 e costumam adotar uma abordagem de baixo para cima, o que quer dizer que começam analisando o custo e as reduções de GEE de tecnologias ou medidas individuais e depois agregam esses resultados para estimar o custo e potencial de diferentes portfólios de opções (S. Zhang et al., 2022).

Figura 3. Mapa conceitual dos modelos de engenharia



Fonte: Autores (2025).

Uma das principais vantagens dos modelos de engenharia é sua capacidade de captar a heterogeneidade das diferentes opções de redução e identificar as combinações de medidas mais econômicas. Por exemplo, um modelo de engenharia pode analisar os custos e benefícios de diferentes medidas de eficiência energética, tecnologias de energia renovável e opções de captura e armazenamento de carbono e, em seguida, identificar a combinação ideal de medidas para atingir uma determinada meta de redução de emissões (Pietzcker et al., 2021).

Em geral esses modelos possuem algumas limitações que devem ser levadas em contas ao utilizar, são modelos complexos e que exigem muitos dados, que pode dificultar a sua execução. Eles também podem ser menos adequados para analisar os impactos macroeconômicos das políticas climáticas por isso os modelos de engenharia podem não capturar todas as interações entre os diferentes setores da economia, o que pode limitar sua capacidade de analisar os impactos mais amplos das políticas climáticas, como por exemplo levar em conta taxas e impostos de carbono assim como efeitos na mudança do preço da energia no consumo total (Chen et al., 2021).

Alguns dos modelos de energia mais utilizados são o *MARKAL* (*MARKEt ALlocation*), o modelo *MESSAGE* (*Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact*) e o modelo *TIMES* (*The Integrated MARKAL-EFOM System*). Cabe ressaltar que nos estudos os modelos são utilizados como parte dos *IAMs*, fornecendo dados técnicos e econômicos detalhados sobre o setor de energia. Os resultados são então integrados à estrutura mais ampla do *IAM*, que inclui outros componentes, como modelos macroeconômicos, modelos climáticos e modelos de impacto social.

Kesicki (2013) usa o modelo de sistema de energia *MARKAL*, que é um modelo de otimização de sistemas de energia de programação linear dinâmico. Criado para simular o sistema de energia e estimar os custos e as emissões associados a várias tecnologias e políticas. O modelo é composto por um conjunto de equações que descrevem o sistema de energia que o modelo resolve procurando a tecnologia e a política ideal que minimizam os custos, enquanto cumprem as metas de demanda de energia e emissões.

Para simular o sistema de energia, o modelo é alimentado com um conjunto de dados de entrada, incluindo as projeções de demanda de energia, o preço de combustíveis e os custos da tecnologia. Quando combinados com a análise dos índices de população, podem gerar curvas *MAC* mais completas e detalhadas do que os métodos existentes. O custo marginal é calculado como a mudança no custo total dividida pela mudança nas emissões. Para ter uma base de comparação foram definidos diferentes níveis de reduções de emissões, variando de 10% a 90% das emissões da linha de base. A combinação do modelo *MARKAL* e da análise de decomposição de índices permitiu uma estimativa mais detalhada das curvas *MAC*, levando em conta as interações entre as diferentes medidas de mitigação e a incerteza associada aos preços futuros dos combustíveis.

O modelo de engenharia do setor elétrico de Pietzcker et al. (2021) busca avaliar os possíveis benefícios e custos de se atingir uma meta de descarbonização mais rígida do *EU ETS* e fornecer percepções sobre os possíveis impactos dessa política no setor de energia renovável, nos custos do sistema de eletricidade e na redução de emissões. Para isso utiliza o Modelo de Investimento de Longo Prazo para o Setor Elétrico da Europa (*LIMES-EU*) com variações das

quatro dimensões a seguir: a meta de redução de emissões, a demanda de eletricidade, os investimentos em capacidade de transmissão e a disponibilidade de tecnologias CCS e nuclear.

Ampliando o modelo de operação e investimento do sistema do setor elétrico europeu para representar corretamente o comércio intertemporal de permissões; aprimoraram a parametrização dos mercados de emissões atuais e das tendências tecnológicas; e incluíram a interação por meio do limite de emissões compartilhado entre a descarbonização no sistema elétrico e outros setores cobertos pelo EU ETS. Isso permite que a análise internalize parcialmente as vantagens dos modelos completos do sistema de energia em relação à inter-relação setorial e aos aspectos mais amplos da análise de cenários, sem renunciar à análise detalhada presente nos modelos detalhados do setor de energia (Pietzcker et al., 2021).

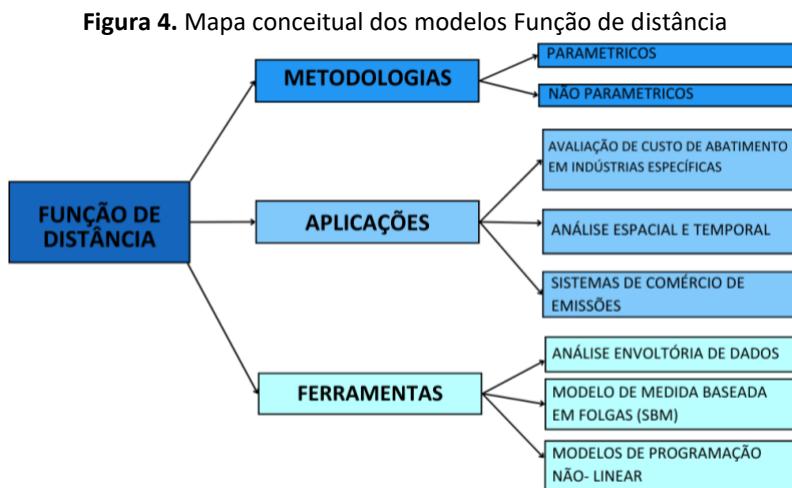
Os modelos de engenharia não são apenas do setor de energia como pode ser visto no modelo do setor de ferro e aço de An et al. (2018) que é composto por cinco módulos principais: um módulo de dados, um modelo de projeção de demanda de serviços, um modelo de tecnologia-energia-meio ambiente, um módulo de política verde e um módulo de saída. O módulo de dados fornece informações sobre a oferta de matérias-primas do mercado, mudanças nos preços de energia, progresso tecnológico, ajuste da estrutura de energia, restrições de emissões e outros fatores. O modelo de projeção de demanda de serviços projeta a demanda futura de serviços com base em dados históricos e tendências de desenvolvimento. O modelo de tecnologia-energia-meio ambiente simula os fluxos de material e energia em diferentes setores durante o processo de produção ou consumo. Com base nisso, o consumo de energia e as emissões em cada setor podem ser calculados, fornecendo um instrumento para avaliar o efeito de políticas de desenvolvimento sustentável de maneira direta. O módulo de política verde inclui políticas de desenvolvimento sustentável, como a promoção de tecnologias de baixo carbono e a substituição de combustíveis limpos. O módulo de saída fornece resultados da simulação.

Os modelos de engenharia são muito interessantes do ponto de vista de levar em conta os detalhes técnicos de setores específicos e por isso podem ser usados para estudar as curvas MAC em setores como da construção civil como foi realizado por Shufan Zhang et al. (2022), para comparar redução de emissões na construção civil entre China e EUA. Com um modelo baseado em uma ferramenta analítica que permite decompor a intensidade de emissão de CO₂ em diferentes fatores e utilizar a regressão ridge para testar a robustez do modelo de avaliação de abatimento de CO₂. No setor da indústria tanto do cimento como Kajaste et al. (2016). Assim, como An et al. (2018), para calcular alternativas de mitigação no setor de ferro e aço, Yang et al. (2022) utilizaram modelos de engenharia para o setor da indústria pesada e o transporte pesado e que são difíceis de substituir. E por se tratar de modelos detalhados de setores específicos, os modelos de engenharia muitas vezes são utilizados como a parte de baixo para cima de modelos híbridos e IAMs.

Função de distância

Nesse método, a função é usada para medir a distância entre o nível atual de emissões e o nível-alvo de emissões. O custo da redução das emissões é então estimado pelo cálculo da mudança nos preços dos insumos necessários para passar do nível atual de emissões para o nível-alvo de emissões. Existem duas metodologias de cálculo: métodos não paramétricos, às

vezes chamados de análise de envelopamento de dados (*DEA*), e métodos paramétricos (Figura 4) (Wang & Zhu 2020).



Fonte: Autores (2025).

Um dos conceitos abordados em diversas pesquisas, como em Du et al. (2015), Rødseth (2013), Daly et al. (2015), (Choi et al., 2012) Wang e Wei (2014) e (Shapiro et al., 2018), o DF é o conceito de preços sombra de carbono, que se refere ao custo de oportunidade associado à emissão GEE, no caso a oportunidade pedida seria a não redução de emissões, refletindo o custo social das emissões e os benefícios associados à sua mitigação. Quando o preço sombra for superior ao custo marginal de abatimento de uma determinada tecnologia ou prática, isso indica que a implementação dessa opção de mitigação é economicamente justificável. Em outras palavras, a redução das emissões por meio dessa opção geraria um benefício econômico que supera o custo associado.

É possível relacionar o preço sombra de carbono com a DF pois ambos tratam da relação entre *outputs* desejáveis, como bens e serviços, e *outputs* indesejáveis, como emissões de gases de efeito estufa (GEE). Um exemplo dessa aplicação é o descrito por Wang e Wei (2014), que utilizaram um método baseado na análise de envelopamento de dados (*DEA*) para avaliar o potencial de economia de energia e redução de emissões no setor industrial de 30 grandes cidades chinesas entre 2006 e 2010. Sendo as variáveis de entrada: capital, mão de obra e energia, a variável de saída desejada: o valor agregado das indústrias, e o volume total de emissões industriais foi tratado como a saída indesejada.

Já o modelo de Rødseth (2013) foi projetado para identificar a maneira menos custosa de reduzir a poluição, baseando-se no princípio do balanço de materiais, o que implica que o peso dos insumos, inclusive os "não econômicos", como o oxigênio, deve corresponder ao peso dos produtos e subprodutos desejáveis. Por meio de uma função de lucro sujeita a restrições de poluição, o lucro é maximizado sujeito à condição de equilíbrio de materiais e à função de distância direcional, que captura a dinâmica da geração de poluição e é usada para representar a restrição de poluição, que é a quantidade máxima de poluição que pode ser gerada com um determinado nível de entradas e saídas desejáveis. A dualidade entre a função de distância direcional e a função de lucro é usada para derivar os custos marginais de redução. Ao introduzir a função de distância direcional como uma restrição e aplicar a dualidade da função de distância direcional à função de lucro, é possível obter condições ideais que permitem identificar e estimar os custos marginais de redução.

O modelo teórico usado por Du et al. (2015) baseia-se na abordagem da função de distância direcional (*DDF*) que é usada para estimar o custo marginal de abatimento da redução de CO₂ sem informações de preço e custo. Para isso, o modelo calcula um conjunto de produtos, incluindo PIB, consumo de energia e emissões de CO₂, usando um conjunto de insumos, incluindo mão de obra, capital e energia com a condição de que a tecnologia de produção seja não decrescente, o que significa que o aumento dos insumos aumentará os resultados.

A abordagem *DDF* encontra a perda de eficiência comparando sua produção real com a produção que seria obtida se ela seguisse todas as recomendações. O preço-sombra da redução de CO₂ é então estimado calculando-se a inclinação da linha tangente do ponto de referência projetado na fronteira de produção. As variáveis foram estimadas usando modelos de regressão de dados de painel sendo elas densidade populacional, taxa de urbanização e estrutura industrial.

Wang et al. (2017) aplicam o modelo de medida baseada em folgas (*SBM*) para considerar a ligação entre os resultados desejáveis e indesejáveis na avaliação da eficiência energética e dos custos de redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) das áreas urbanas das cidades na China. O modelo tradicional de *SBM* pressupõe que todos os resultados são desejáveis e que os insumos são usados para produzir esses resultados desejáveis.

Entretanto, no caso da eficiência energética e dos custos de redução das emissões de CO₂, as emissões de CO₂ são consideradas como resultados indesejáveis, e o modelo *SBM* tradicional não pode levar em conta a compensação entre resultados desejáveis e indesejáveis. Para resolver esse problema adicionam a consideração de que a quantidade de emissões de CO₂ pode aumentar proporcionalmente à taxa de melhoria da folga do produto interno bruto (PIB), que é a diferença entre o PIB real e o PIB potencial. Com isso criando a premissa da fraca descartabilidade de resultados indesejáveis, o que significa que a redução nas emissões de CO₂ por unidade de PIB causada pela atualização tecnológica será compensada pela liberação de resultados indesejáveis causados pela expansão da escala de produção.

Portanto a função distância é mais recomendada em setores específicos, principalmente na indústria e geração de energia e possui vantagens por estabelecer relações econômicas com os dados técnicos que são geralmente os insumos necessários para produção. Nesse sentido, é necessário colher informações sobre quais são as entradas no sistema de produção, assim como quais os processos e suas reações. Por exemplo, ao analisar a quantidade de carvão que entra em um forno e qual a geração de energia que ele tem, os efeitos negativos vão ser a redução dessa energia total gerada por uma ação de mitigação. Enquanto um resultado positivo é a redução das emissões de GEE.

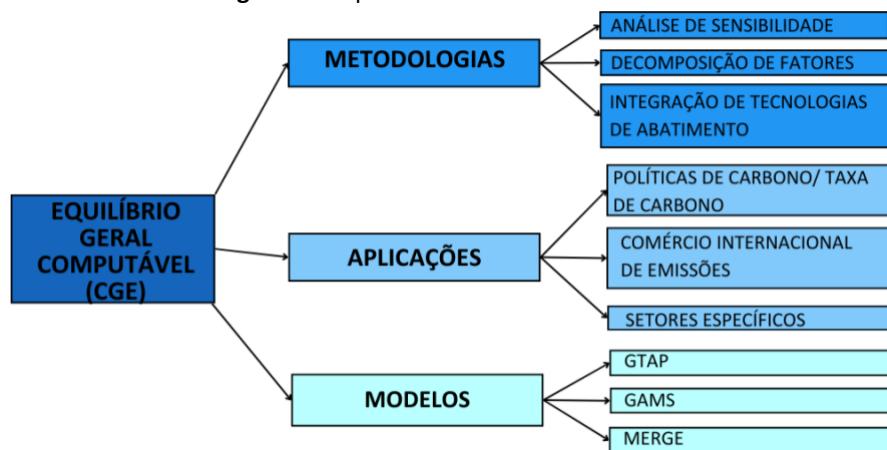
Assim, o método DF pode ser usado para estimar a eficiência de diferentes processos ou tecnologias de produção e para estimar o potencial de redução de emissões e por se tratar de um modelo com saídas desejáveis e indesejáveis, é possível incluir questões além dos GEE como efeitos na saúde como uma variável indesejável da poluição, permitindo calcular mesmo que de maneira simplificada por exemplo o efeito que os GEE que foram calculados a partir dos insumos vão causar na saúde, sendo uma variável que vai aumentar o preço sombra do carbono.

Modelo CGE

Os principais CGE são o *GTAP* (Global Trade Analysis Project) e o modelo *GAMS* (General Algebraic Modeling System) como pode ser visto na figura 5 na síntese sobre os modelos. São capazes de simular as interações entre diferentes setores da economia e estimam os impactos das políticas climáticas sobre a atividade econômica, as emissões e outras variáveis. Os agentes econômicos podem ser famílias, empresas e governos. Uma de suas vantagens é que podem capturar as ligações não só dos agentes como dos diferentes setores da economia como o produtor de cana de açúcar e o aumento da demanda de biocombustíveis e interligar as demandas e necessidades diferentes de cada um.

No entanto, os modelos CGE também têm limitações, como as suposições e simplificações necessárias para tornar o modelo tratável já que os dados são mais agregados como por exemplo no setor de transporte que não são como grandes indústrias que possuem horários de trabalho e processos bem definidos, nesse caso cada veículo seria uma pequena indústria se movendo pela cidade (Paroussos et al., 2019).

Figura 5. Mapa conceitual dos modelos CGE



Fonte: Autores (2025).

Na Alemanha, Sands e Schumacher (2009) utilizaram um modelo de equilíbrio geral computável de segunda geração para quantificar os custos de redução das emissões. Os autores calcularam as curvas de custo marginal de abatimento considerando seis componentes principais das reduções de emissões: atividade econômica, mix de produtos, eficiência energética, emissões de gases de efeito estufa não CO₂, captura e armazenamento de carbono (CCS) e energia renovável. Uma das principais inovações do estudo foi a utilização da decomposição *LMDI* (*Logarithmic Mean Divisia Index*) que permitiu analisar a contribuição de cada componente para a redução total das emissões separadamente.

Wang et al. (2009) utilizaram o modelo TDGE_CHN para analisar a economia chinesa e as implicações de políticas de redução de emissões. Esse modelo se destaca por incorporar um mecanismo dinâmico recursivo que permite simular a evolução da economia ao longo do tempo, considerando mudanças tecnológicas endógenas. A demanda é calculada a partir do PIB, pegando dados como consumo, investimento e exportações líquidas. O modelo diferencia investimentos em capital físico e em capital de conhecimento, que se refere a atividades de pesquisa e desenvolvimento. A alocação da poupança entre esses dois tipos de investimento é uma etapa crucial, pois determina o quanto o mercado está disposto a investir em inovação tecnológica e qual a capacidade de crescimento da economia. As demandas de exportação e

os suprimentos de importação são colhidos por dados fora do modelo, enquanto as funções de custo de redução marginal são estimadas utilizando uma função log-linear.

Cui et al. (2014), buscando analisar o comércio de emissões de carbono na China, com foco na meta de 2020, empregaram o modelo CHINAGEM, uma versão de um *CGE* especialmente calibrado para a China. Através da simulação de diferentes cenários, sendo um de referência com a ausência de um sistema de comércio de emissões, e um com a existência de projetos piloto e a implementação de um mercado nacional unificado, avaliaram o impacto do comércio de emissões sobre diversos aspectos da economia chinesa, incluindo o crescimento econômico, a distribuição de renda e a competitividade setorial. As principais variáveis do modelo são a disponibilidade de tecnologias limpas, os custos de energia e a estrutura produtiva da economia.

O estudo de Shihui Zhang et al. (2021) oferece uma análise dos co-benefícios para a saúde associados à transição para a neutralidade de carbono na China. Os autores utilizaram uma abordagem multimodelo, combinando modelos de equilíbrio geral computável (como o CHEER-LCT) com modelos de qualidade do ar e saúde (CHEER-AIR e CHEER-HA), para simular a economia, as emissões de poluentes e os impactos na saúde sob diferentes cenários de descarbonização. Por exemplo, sendo possível traçar uma diferença entre caminhos de energia renovável e CCS, sendo que o segundo ainda gera poluição que deve ser capturada e, portanto, pode ter efeitos nas pessoas próximas às fontes geradoras. O modelo é muito interessante, mas ainda apresenta simplificações nos benefícios, que incluem a redução da mortalidade prematura e de doenças respiratórias e cardíacas. Mostrando que a neutralidade de carbono pode gerar significativos co-benefícios para a saúde pública, especialmente quando se adotam trajetórias de descarbonização baseadas em energias renováveis.

Dos modelos estudados, o *CGE* é mais generalista que os outros três, por possuírem foco em apenas um setor ou indústria. No caso, o *CGE* engloba toda a economia e, na maioria dos casos, estuda como as opções de mitigação interferem no país como um todo ou, ainda mais generalizado, como um comércio de emissões ou também pelo *CGE* proposto por Paroussos et al. (2019) para estudar as interações entre países por meio de clubes do clima. Introduzem dois recursos inovadores na modelagem de equilíbrio geral computável para a avaliação da política climática: uma representação das repercussões tecnológicas e uma representação dos mercados internacionais de capital.

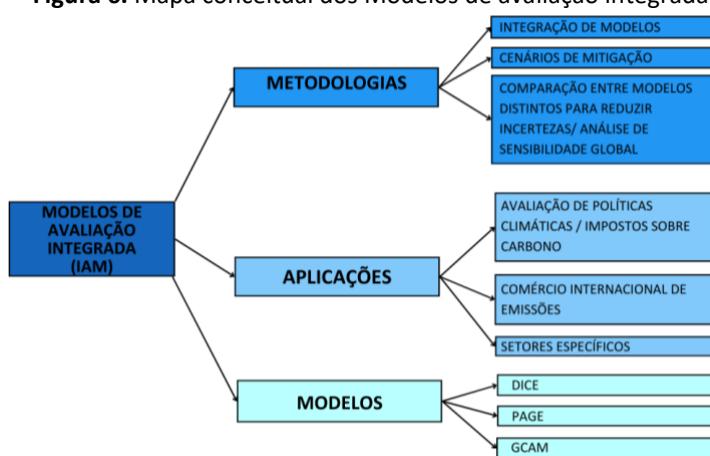
Apesar da sua boa capacidade de comparar a economia como um todo, algumas generalizações são necessárias e, portanto, o modelo acaba por perder detalhes técnicos. Nesse sentido, surgem os próximos dois modelos, que buscam unir a análise econômica do *CGE* com análises mais técnicas vistas nos modelos anteriores. Por isso, é interessante ao pesquisador possuir conhecimento tanto do modelo mais técnico como do mais econometérico para tentar unir as duas abordagens e, com os modelos híbridos e *IAMs* gerar resultados mais completos.

Modelos de avaliação integrada (Integrated Assessment Models - IAMs)

Os exemplos Modelos de Avaliação Integrada (*IAMs*) incluem o modelo *DICE* (*Dynamic Integrated Climate-Economy*), o modelo *PAGE* (*Policy Analysis of the Greenhouse Effect*) e o

modelo *GCAM* (*Global Change Assessment Model*) (Figura 6). Os *IAMs* de baixo para cima baseiam-se em modelos econômicos e de engenharia detalhados de setores individuais, como energia, transporte e agricultura, e depois integram esses modelos setoriais em uma estrutura mais ampla para analisar as interações e as compensações entre diferentes setores e políticas (Markandya et al., 2018).

Figura 6. Mapa conceitual dos Modelos de avaliação integrada



Fonte: Autores (2025)

Por outro lado, os *IAMs top-down* são baseados em modelos macroeconômicos que capturam o comportamento agregado da economia e, em seguida, impõem restrições ambientais e energéticas para analisar o impacto das políticas sobre o crescimento econômico, emissões e mudança climática. Existem também *IAMs* que adotam uma abordagem híbrida, que mistura abordagens de baixo para cima (*bottom-up*) e de cima para baixo (*top-down*) para obter o melhor dos dois métodos. Portanto, cabe ao pesquisador decidir qual abordagem ele deseja seguir, dependendo do objeto, do nível de detalhamento desejado e da disponibilidade de dados e recursos (Gu et al., 2021).

Shindell et al. (2012) é um dos artigos mais citados na literatura, oferecendo uma avaliação global das atividades de mitigação de poluentes de vida curta, a saber, PM2.5, carbono negro (*BC*), metano (*CH4*) e ozônio, em relação à saúde humana e danos climáticos. O modelo IIASA *GAINS* foi usado para determinar as opções mais eficazes na redução de emissões. Os modelos climáticos *ECHAM5-HAMMOZ* e *GISSPUCCINI* são então implementados para simular as mudanças nas concentrações atmosféricas e o forçamento radiativo associado. Com isso os impactos na saúde e na agricultura foram estimados demonstrando que a implementação de medidas de controle de poluentes de vida curta, especialmente em países como China e Índia, pois uma pequena diferença na mortalidade em países tão populosos pode gerar benefícios significativos para a saúde humana, sendo possível evitar muitas mortes prematuras e perdas na produção agrícola. Além de identificar as medidas de controle de poluição mais custo-eficazes, como a redução das emissões de metano em aterros sanitários e a redução das emissões de carbono negro de veículos a diesel.

Uma métrica proposta por Babacan et al. (2020) ao utilizar um *IAM* é a "energia de redução de carbono" (*CAE*), que representa a quantidade de energia necessária para reduzir uma determinada massa de CO₂ equivalente é calculada através de balanços de massa e energia, considerando as entradas e saídas de energia em cada processo ou tecnologia. O que permite comparar tecnologias, como a produção de energia renovável, a captura direta de carbono do

ar (*DACCS*) e a bioenergia com captura e armazenamento de carbono (*BECCS*). Para isso as opções de mitigação possuem três categorias: prevenção, fixação e remoção de carbono.

A prevenção envolve a substituição de fontes de energia fósseis por fontes de baixo carbono e a implementação de medidas de eficiência energética. A fixação consiste na incorporação de CO₂ em produtos ou combustíveis, enquanto a remoção envolve tecnologias como *BECCS* e *DACCS*. Por exemplo, a eficiência energética em edifícios apresenta um *CAE* negativo, indicando que economiza energia ao reduzir as emissões, enquanto tecnologias como *DACCS*, que exigem grande quantidade de energia para capturar o CO₂, apresentam um *CAE* elevado. A *BECCS*, dependendo de sua aplicação, apresenta um *CAE* relativamente baixo sendo interessante na remoção de carbono, por exemplo, quando a *BECCS* é utilizada para substituir outras fontes de energia, o *CAE* é menor do que quando é utilizada apenas para remover CO₂ já que por substituir uma fonte poluidora, seus efeitos são maiores que apenas criar uma nova fonte.

O estudo de Gu et al. (2023) apresenta uma análise das medidas que podem ser adotadas para reduzir a poluição por nitrogênio nas terras agrícolas a partir de 11 medidas que principalmente aumentam a produtividade agrícola e a eficiência do uso de fertilizantes. Através da integração do potencial de redução dessas medidas aos modelos globais *CHANS* (*coupled human and natural systems*), *MAgPIE* (*Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment*) e *IMAGE* (*Integrated Model to Assess the Global Environment*), os pesquisadores simulam os impactos dessas intervenções no orçamento global de nitrogênio com resultados que indicam que a implementação dessas medidas pode gerar benefícios econômicos significativos, incluindo a redução dos custos com fertilizantes, o aumento da produtividade agrícola e a melhoria da saúde humana. Além disso, a redução da poluição por nitrogênio contribui para a proteção dos ecossistemas aquáticos e terrestres. No entanto, a implementação dessas medidas enfrenta desafios, como a falta de recursos financeiros e o conhecimento limitado dos agricultores e para isso sugerem a criação de mercados de créditos de nitrogênio (*NCS*), que permitiriam que os agricultores fossem compensados financeiramente pela redução da poluição.

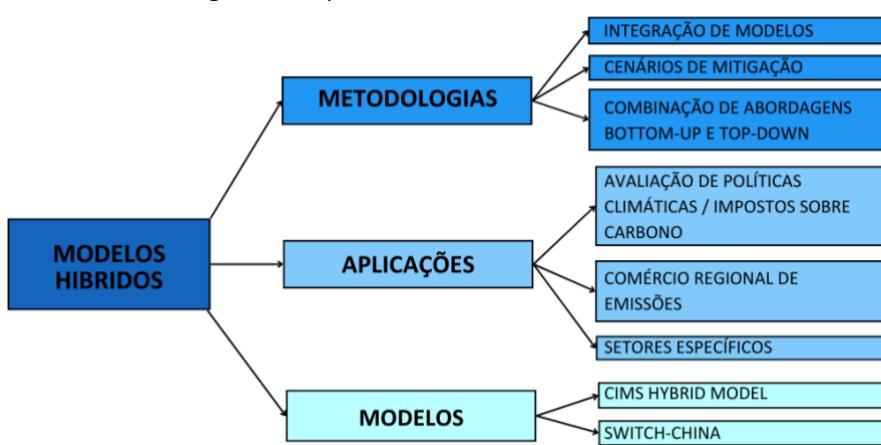
Portanto os modelos de avaliação integrada são mais recomendados quando o pesquisador deseja estudar a mitigação ao longo do globo, comparando quais as opções com melhores custos no mundo todo como o caso de Shindell et al. (2012), ou ainda modelos complexos como o de Fujimori et al. (2017) ou Riahi et al. (2015) que buscaram comparar diversos *IAM* diferentes para reduzir as incertezas. Outro campo interessante para seu uso é para estudar como as *MACs* interagem entre países, como nos estudos de Aldy et al. (2016), Van Vuuren et al. (2020), Bauer et al. (2020) e Iyer et al. (2015) que buscam estudar as políticas climáticas e como certos países podem se beneficiar de estudar as emissões e mitigações globalmente e fazer comércio sobre as emissões em países menos desenvolvidos.

Modelos híbridos

Uma das partes mais complexas desta revisão foi identificar quais artigos utilizaram uma modelagem híbrida, sendo mais corriqueiro somente a citação de qual foi o modelo principal utilizado. Assim, foi necessária a leitura completa dos estudos para uma melhor definição. Como os híbridos são uma combinação de abordagens, foi necessário abordar primeiramente

os modelos prévios, para conhecer seu funcionamento, e depois realizar uma correlação (Figura 7).

Figura 7. Mapa conceitual dos Modelos híbridos



Fonte: Autores (2025).

Nos modelos híbridos, a abordagem *bottom-up* é usada para modelar os detalhes técnicos e econômicos de setores individuais, enquanto a abordagem *top-down* é usada para capturar os aspectos macroeconômicos e comportamentais da economia. Ao combinar os pontos fortes de ambas as abordagens, os modelos híbridos podem capturar as interações e os *feedbacks* entre diferentes setores e capturar outros fatores como os impactos da tecnologia e da inovação na economia e no meio ambiente e fornecer estimativas mais precisas dos custos e benefícios de longo prazo das políticas climáticas (Cole et al., 2021).

O desafio então é interligar os dados de um modelo com o outro, podendo acarretar uma grande complexidade e carga computacional da integração de modelos *bottom-up* e *top-down*. Então o trabalho do pesquisador é principalmente na definição de cenários para que eles possam ser gerados em ambos os modelos e facilitar assim a integração. Para isso são necessários muitos dados e recursos para serem usados para gerar os modelos, sua complexidade também torna mais difícil de validar e interpretar.

Por lidar com mais de um modelo existe a possibilidade de inconsistências e erros nas suposições e nos parâmetros de modelagem, já que cada modelo possui os seus erros e incertezas quando se utilizam vários ocorre a soma dos erros e incertezas de cada um, o que pode levar a resultados tendenciosos ou imprecisos. Sendo assim os modelos híbridos podem ser sensíveis à escolha de suposições e parâmetros de modelagem e podem exigir uma análise de sensibilidade extensa para avaliar a robustez dos resultados (Daly et al., 2015).

Guo et al. (2021) utilizaram uma abordagem híbrida para investigar a conexão entre as emissões de dióxido de carbono e o progresso econômico na China. Empregando uma análise da bibliografia existente e dados de painéis para desenvolver um modelo econômico com o objetivo de estudar a relação entre as emissões de CO₂ fatores como rendimento, inovação sustentável, investimentos no ramo de energia e uso de energia renovável. A pesquisa confirma a teoria da curva ambiental de Kuznets na China: as emissões de CO₂ aumentam conforme a economia cresce até certo ponto antes de começarem a diminuir. A análise detalha essa relação ao apontar a importância da ecoinovação e dos investimentos no setor energético para a redução das emissões a longo prazo. Inovações possibilitam a adoção de tecnologias mais sustentáveis e eficientes que diminuem a pegada de carbono da produção ao considerarem o impacto dos investimentos no setor energético que podem tanto elevar

quanto reduzir as emissões conforme o tipo de investimento realizado. Por exemplo, investimentos em energias renováveis contribuem para a redução das emissões, ao passo que os investimentos em energia fóssil tendem a aumentá-las.

Kiuila e Rutherford (2013a) empregam um modelo de equilíbrio geral computável para avaliar os custos de redução das emissões de CO₂ na Suíça, o modelo *Swiss CGE* inclui diversos setores e mercados, permitindo simular as interações entre eles e para alimentar o modelo os dados utilizados foram recolhidos de especialistas de estudos anteriores para estimar os custos de diferentes tecnologias de redução, como troca de combustível, melhorias na eficiência energética e captura e armazenamento de carbono. Essa abordagem híbrida proposta ainda permitiu definir duas funções distintas de representar a redução de GEE. A abordagem de toda a economia pressupõe uma capacidade de redução fixa e aplica o *MAC* em toda a economia, e não em um setor específico. Nesse caso, o serviço de redução da poluição Q é modelado usando o potencial técnico X e o capital K, em que o capital é representado pelos custos dos veículos no setor de transportes.

O potencial de redução da poluição por meio de atividades técnicas de redução fornece um limite superior para a redução. A redução adicional da poluição pode ser obtida por meio de uma diminuição na atividade econômica. A abordagem específica do setor, por outro lado, permite um processo de redução específico do setor e a redução é proporcional ao tamanho do setor. Em vez do *MAC*, ela calibra o custo total da redução, o que exige que a matriz de contabilidade social (*SAM*) original seja reequilibrada. Essa abordagem captura as interações entre os diferentes setores da economia e permite a modelagem endógena das tecnologias de redução.

Kiuila e Rutherford (2013b) apresentam uma metodologia inovadora para modelar a curva de custo marginal de abatimento a partir da utilização conjunta de um modelo de engenharia e um *CGE*. Os autores propõem uma aproximação por partes dessa curva, utilizando uma função suave que se baseia na elasticidade constante de substituição (*CES*) entre diferentes tecnologias de redução de poluição. Desse modo, combina a precisão de ajustes numéricos com a facilidade de análise de ajustes analíticos. A curva *MAC* é aproximada por uma série de segmentos lineares e curvos, com objetivo de gerar uma representação mais realista e flexível das relações entre os custos de redução e os níveis de redução alcançados. Baseado na função de produção de *Arrow-Debreu* e é calibrado utilizando dados de diversas fontes, como contas nacionais e estudos de engenharia. O modelo pode ser utilizado para avaliar os impactos de diferentes políticas ambientais, como a implementação de um imposto sobre o carbono, que por realizar a agregação com o *CGE* permite analisar não apenas as mudanças nas emissões, mas também os impactos sobre o crescimento econômico, a distribuição de renda e os diferentes setores da economia.

Os modelos híbridos são mais recomendados numa escala menor que os *IAMs* pois devido a sua complexidade de rodar mais de um modelo ao mesmo tempo assim como a dificuldade de coleta de dados para diminuir as incertezas é mais recomendado aplicar os modelos a estados/províncias ou no máximo em países. A sua maior vantagem é a capacidade de unir modelos distintos para fazer essa abordagem geral. É possível utilizar um modelo de especialistas caso seja o único disponível para o setor agrícola enquanto um modelo mais complexo de engenharia é utilizado para energia e um terceiro para a indústria. Sendo possível

uni-los por meio de um *CGE* para agregar dados econométricos e permitir um modelo mais amplo.

CONCLUSÃO

Um fator emergente nos estudos de políticas de mudança climática são os cobenefícios. Também podem ser chamados apenas de benefícios e acontecem, pois, as medidas de redução de GEE geram efeitos adicionais, também conhecidos como efeitos externos ou auxiliares (Deng et al., 2017), por exemplo, a eletrização de veículos não reduz apenas a emissão de CO₂, mas também reduz as emissões de óxidos de nitrogênio (NOX) já que não ocorre mais a combustão. As aplicações neste campo se concentram principalmente no impacto das sinergias ou compensações no MAC. Sendo assim causando efeitos positivos na qualidade do ar e na saúde que podem compensar parcialmente os custos iniciais de redução de carbono e, assim, resultar em uma mudança para baixo nos MACCs.

Entretanto, algumas estratégias de mitigação, como a CCS, podem gerar cobenefícios negativos, pois o grande consumo de eletricidade para capturar CO₂ aumenta a emissão de poluentes atmosféricos. Assim, os MACCs originais se deslocam para cima impulsionados pelos cobenefícios monetizados, indicando um aumento subsequente nos custos de redução. Essas descobertas indicam uma compensação entre a mitigação de GEEs e o impacto ambiental resultante. O cobenefício analisado com mais frequência diz respeito à qualidade do ar (Wagner et al., 2012), seguido pela saúde humana (Beach et al., 2015) e pela segurança energética (Selvakkumaran et al., 2014).

A escolha do modelo adequado deve levar em conta o contexto específico da análise, os objetivos e as características do sistema econômico em questão. Lembrando que a integração de diferentes abordagens e a consideração de uma gama mais ampla de impactos podem melhorar a representação do modelo e dos caminhos traçados para mitigação, porém quanto mais complexo o sistema maior a necessidade de dados e poder computacional, assim como a inclusão de mais detalhes podem causar um aumento das incertezas que são multiplicadas e não adicionadas.

Assim, como um risco maior de subestimar ou superestimar um fator que pode ser contado duas vezes, como por exemplo o aumento de eficiência pode ser contado tanto em um processo químico como em um processo de geração de energia e podem acabar não sendo aditivos e sim que um interfira no outro. O que significa que apesar de existirem muitos modelos e muitos dados as pesquisas que parecem já “resolvidos” não é só rodar o modelo, ainda precisam do acompanhamento dos pesquisadores para garantir a qualidade dos resultados. A literatura existente fornece uma base sólida para essa discussão, mas ainda há espaço para mais pesquisas que explorem a interseção entre diferentes metodologias e suas aplicações práticas na mitigação das mudanças climáticas.

O Quadro 2 a seguir apresenta um panorama dos métodos utilizados em pesquisas sobre MAC. Esse quadro serve como um guia para pesquisadores, indicando as vantagens e desvantagens dos métodos e os fatores a serem considerados. Ao consultar o quadro, os pesquisadores podem identificar rapidamente os métodos mais adequados para suas pesquisas e caso estejam buscando aplicar novos métodos podem comparar os resultados de seus estudos com os métodos tradicionais, permitindo que valide sua pesquisa tanto por utilizar abordagens que existem ou a comparar a eficácia de uma nova abordagem.

Quadro 2. Síntese das vantagens e desvantagens das metodologias

	Vantagens	Desvantagens
Expert	Simplicidade de cálculo e capacidade de classificar as medidas econômicas; pode ser usado para avaliar a relação custo-benefício de opções tecnológicas específicas, que em alguns casos não poderiam ser modeladas de outro jeito; pode incorporar fatores qualitativos que podem não ser capturados por outros modelos.	A dependência de conhecimento especializado pode introduzir subjetividade e vieses; subestimação ao ignorar os custos não financeiros; falta de caminhos e efeitos dinamicamente interativos entre os setores; limitada em sua capacidade de otimizar portfólios de opções ou minimizar os custos do sistema.
ENG	Oferece uma riqueza de características técnicas detalhadas sobre setores específicos como o de energia; identifica as combinações mais eficientes e econômicas de medidas para reduzir as emissões, otimizando o portfólio de opções; pode ser aplicado a diversos setores, regiões e cenários; geralmente é transparente e de código aberto, facilitando a análise e a crítica.	Requer muitos dados e conhecimento especializado, dificultando seu uso e interpretação; foco em características técnicas e custos de tecnologias individuais, limitando a análise de impactos macroeconômicos; sujeitos a incertezas e suposições sobre custos, desempenho e disponibilidade de tecnologias futuras, o que pode afetar a precisão dos resultados.
DF	Capta a interação entre insumos como mão de obra e capital, permitindo uma estimativa mais precisa do custo de redução de emissões; concentra-se na substituição de fatores nos processos de produção, medindo o grau em que diferentes insumos podem ser substituídos; captura os custos ocultos dos produtores e consumidores, como os danos ambientais e os impactos na saúde pública; leva em conta os efeitos de recuperação de preço, como a tendência dos consumidores de aumentar o consumo quando o preço diminui.	Limita-se a medir o custo da redução de emissões no nível atual, não captando efeitos de longo prazo; assume que o custo de redução é proporcional ao nível de emissões, o que pode não ser exato em todos os casos; exige dados detalhados sobre o processo de produção, que podem não estar disponíveis; concentra-se em substituições de fatores, não capturando a gama completa de interações.
CGE	Adequado para analisar os impactos macroeconômicos das políticas climáticas, simulando interações entre setores e estimando impactos em PIB, emprego e comércio; captura as interligações entre agentes econômicos e setores da economia, permitindo analisar os impactos indiretos e em toda a economia das políticas climáticas; permite analisar os efeitos de diferentes níveis de taxa de carbono sobre a economia, incluindo os impactos na produção, consumo e investimentos.	Modelo pode fazer simplificações nos dados de entrada perdendo a riqueza dos detalhes técnicos; está sujeito a incertezas sobre o futuro, como crescimento econômico e mudanças tecnológicas; não captura todas as interações entre setores e pode não analisar impactos em setores não de mercado; exige grande quantidade de dados que podem não estar disponíveis ou não ser confiáveis.
IAM	Simula as interações entre diferentes setores da economia, estimando impactos em emissões, PIB, emprego e saúde pública; pode analisar uma ampla gama de políticas climáticas, como impostos sobre o carbono e sistemas de comércio de emissões; usado em maior escala como em países ou blocos econômicos; riqueza de detalhes ao incorporar dados de modelos de engenharia.	Complexo e exige muitos dados, o que pode dificultar seu uso interpretação e validação dos resultados; depende de conhecimento especializado e recursos computacionais para ser desenvolvido e executado; suscetível a incertezas relacionadas à qualidade e quantidade dos dados utilizados, bem como às simplificações e hipóteses inerentes aos modelos.
Híbrido	Dados técnicos detalhados ao incorporar dados de modelos de engenharia; agregação e simplificação na falta de dados por meio de modelos econôméticos; capacidade de adicionar outras variáveis para estudo, como inovação, evolução da tecnologia ou benefícios à saúde; são personalizáveis para analisar diferentes setores, regiões e cenários.	Complexidade e carga computacional; exige uma grande quantidade de dados e recursos para serem desenvolvidos e executados, e podem ser difíceis de validar e interpretar devido à complexidade da estrutura de modelagem; pode ser sensível à escolha das suposições e dos parâmetros de modelagem e podem exigir uma extensa análise de sensibilidade para avaliar a robustez dos resultados.

Pesquisas futuras podem aprofundar a análise das dimensões geográficas, reconhecendo que a eficácia das ações ambientais e de abatimento varia significativamente em diferentes contextos espaciais e econômicos, demandando a exploração de fatores locais, regionais, nacionais e globais. Além disso, podem incorporar métodos mais dinâmicos e interativos para lidar com a incerteza e os impactos de curto e longo prazo, o que envolve o uso de análises com *feedback* e modelos que considerem a evolução temporal dos custos e os efeitos cumulativos das medidas de mitigação. A aplicação de técnicas de otimização multiobjetivo, como a otimização de Pareto, emerge como uma estratégia promissora para aprimorar a tomada de decisões, especialmente em cenários com custos negativos ou incentivos econômicos complexos. Outro ponto de possíveis estudos é a redução das incertezas inerentes às análises atuais, sugerindo a combinação de diferentes abordagens analíticas, como as multicritérios, e o desenvolvimento de novos critérios de ranqueamento que ponderem as preferências entre custos e benefícios do abatimento.

REFERÊNCIAS

- Aldy, J., Pizer, W., Tavoni, M., Reis, L. A., Akimoto, K., Blanford, G., ... & Sano, F. (2016). Economic tools to promote transparency and comparability in the Paris Agreement. *Nature Climate Change*, 6(11), 1000-1004. <https://doi.org/10.1038/nclimate3106>
- An, R., Yu, B., Li, R., & Wei, Y. M. (2018). Potential of energy savings and CO₂ emission reduction in China's iron and steel industry. *Applied energy*, 226, 862-880. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.044>
- Babacan, O., De Causmaecker, S., Gambhir, A., Fajard, M., Rutherford, A.W., Fantuzzi, A. and Nelson, J., 2020. Assessing the feasibility of carbon dioxide mitigation options in terms of energy usage. *Nature Energy*, 5(9), 720-728. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0646-1>
- Bai, C., Feng, C., Yan, H., Yi, X., Chen, Z., & Wei, W. (2020). Will income inequality influence the abatement effect of renewable energy technological innovation on carbon dioxide emissions? *Journal of Environmental Management*, 264, 110482. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110482>
- Bauer, N., Bertram, C., Schultes, A., Klein, D., Luderer, G., Kriegler, E., Popp, A. and Edenhofer, O., 2020. Quantification of an efficiency–sovereignty trade-off in climate policy. *Nature*, 588(7837), 261-266. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2982-5>
- Beach, R. H., Creason, J., Ohrel, S. B., Ragnauth, S., Ogle, S., Li, C., ... & Salas, W. (2015). Global mitigation potential and costs of reducing agricultural non-CO₂ greenhouse gas emissions through 2030. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 12(sup1), 87-105. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2015.1110183>
- Bouman, E. A., Lindstad, E., Rialland, A. I., & Strømman, A. H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 408-421. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>
- Busch, J., Engelmann, J., Cook-Patton, S. C., Griscom, B. W., Kroeger, T., Possingham, H., & Shyamsundar, P. (2019). Potential for low-cost carbon dioxide removal through tropical reforestation. *Nature Climate Change*, 9(6), 463-466. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0485-x>
- Chen, X., Liu, Y., Wang, Q., Lv, J., Wen, J., Chen, X., ... & McElroy, M. B. (2021). Pathway toward carbon-neutral electrical systems in China by mid-century with negative CO₂ abatement costs informed by high-resolution modeling. *Joule*, 5(10), 2715-2741. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.10.006>
- Choi, Y., Zhang, N., & Zhou, P. (2012). Efficiency and abatement costs of energy-related CO₂ emissions in China: A slacks-based efficiency measure. *Applied Energy*, 98, 198-208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.024>
- Clarivate (2017). Web of Science: A closer look at cited and citing half-lives. Recuperado de <https://clarivate.com/webofsciencegroup/article/a-closer-look-at-cited-and-citing-half-lives/>
- Cole, W. J., Greer, D., Denholm, P., Frazier, A. W., Machen, S., Mai, T., & Baldwin, S. F. (2021). Quantifying the challenge of reaching a 100% renewable energy power system for the United States. *Joule*, 5(7), 1732-1748. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.05.011>
- Cui, L. B., Fan, Y., Zhu, L., & Bi, Q. H. (2014). How will the emissions trading scheme save cost for achieving China's 2020 carbon intensity reduction target? *Applied Energy*, 136, 1043-1052. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.021>
- Daelman, M. R., van Voorthuizen, E. M., van Dongen, U. G., Volcke, E. I., & van Loosdrecht, M. C. (2012). Methane emission during municipal wastewater treatment. *Water research*, 46(11), 3657-3670. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.04.024>
- Daly, H. E., Scott, K., Strachan, N., & Barrett, J. (2015). Indirect CO₂ emission implications of energy system pathways: linking IO and TIMES models for the UK. *Environmental Science & Technology*, 49(17), 10701-10709. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01020>
- Deng, H. M., Liang, Q. M., Liu, L. J., & Anadon, L. D. (2018). Co-benefits of greenhouse gas mitigation: a review and classification by type, mitigation sector, and geography. *Environmental Research Letters*, 12(12), 123001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa98d2>
- Dietz, S., Bowen, A., Dixon, C., & Gradwell, P. (2016). 'Climate value at risk' of global financial assets. *Nature Climate Change*, 6(7), 676-679. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2972>
- Drouet, L., Bosetti, V., & Tavoni, M. (2015). Selection of climate policies under the uncertainties in the Fifth Assessment Report of the IPCC. *Nature climate change*, 5(10), 937-940.x <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2721>
- Drouet, L., Bosetti, V., Padoan, S. A., Aleluia Reis, L., Bertram, C., Dalla Longa, F., ... & Tavoni, M. (2021). Net zero-emission pathways reduce the physical and economic risks of climate change. *Nature Climate Change*, 11(12), 1070-1076. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01218-z>
- Du, L., Hanley, A. & Wei, C. (2015). Marginal Abatement Costs of Carbon Dioxide Emissions in China: A Parametric Analysis. *Environ Resource Econ*, 61, 191-216. <https://doi.org/10.1007/s10640-014-9789-5>
- Färe, R., Grosskopf, S., & Pasurka Jr, C. A. (2007). Environmental production functions and environmental directional distance functions. *Energy*, 32(7), 1055-1066. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.09.005>
- Frondel, M., Horbach, J., & Rennings, K. (2007). End-of-pipe or cleaner production? An empirical comparison of environmental innovation decisions across OECD countries. *Business strategy and the environment*, 16(8), 571-584. <https://doi.org/10.1002/bse.496>

- Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., Takahashi, K., Herran, D.S., Dai, H., Hijioka, Y. and Kainuma, M., 2017. SSP3: AIM implementation of shared socioeconomic pathways. *Global Environmental Change*, 42, 268-283. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009>
- Gambhir, A., George, M., McIeon, H., Arnell, N. W., Bernie, D., Mittal, S., ... & Monteith, S. (2022). Near-term transition and longer-term physical climate risks of greenhouse gas emissions pathways. *Nature Climate Change*, 12(1), 88-96. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01236-x>
- Glanemann, N., Willner, S. N., & Levermann, A. (2020). Paris Climate Agreement passes the cost-benefit test. *Nature communications*, 11(1), 110. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13961-1>
- Gu, B., Zhang, X., Lam, S. K., Yu, Y., van Grinsven, H. J., Zhang, S., ... & Chen, D. (2023). Cost-effective mitigation of nitrogen pollution from global croplands. *Nature*, 613(7942), 77-84. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05481-8>
- Gu B, Zhang L, Van Dingenen R, Vieno M, Van Grinsven HJ, Zhang X, Zhang S, Chen Y, Wang S, Ren C, Rao S. (2021). Abating ammonia is more cost-effective than nitrogen oxides for mitigating PM2.5 air pollution. *Science*. 374(6568), 758-62. <https://doi.org/10.1126/science.abf8623>
- Guo, J., Zhou, Y., Ali, S., Shahzad, U., & Cui, L. (2021). Exploring the role of green innovation and investment in energy for environmental quality: An empirical appraisal from provincial data of China. *Journal of Environmental Management*, 292, 112779. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112779>
- Havlík, P., Valin, H., Herrero, M., Obersteiner, M., Schmid, E., Rufino, M. C., ... & Notenbaert, A. (2014). Climate change mitigation through livestock system transitions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(10), 3709-3714. <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1308044111>
- Heitmann, N. & Peterson, S. (2014). The potential contribution of the shipping sector to an efficient reduction of global carbon dioxide emissions. *Environ. Sci. Policy*, 42, 56e66. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.05.001>
- Herrero, M., Havlík, P., Valin, H., Notenbaert, A., Rufino, M.C., Thornton, P.K., Blümmel, M., Weiss, F., Grace, D., & Obersteiner, M. (2013). Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 110(52), 20888-20893. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308149.110>
- Huang, S. K., Kuo, L., & Chou, K. L. (2016). The applicability of marginal abatement cost approach: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 127, 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.013>
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, <https://doi.org/10.59327/ipcc/ar6-9789291691647>
- Iyer, G. C., Clarke, L. E., Edmonds, J. A., Flannery, B. P., Hultman, N. E., McJeon, H. C., & Victor, D. G. (2015). Improved representation of investment decisions in assessments of CO₂ mitigation. *Nature Climate Change*, 5(5), 436-440. <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nclimate2553>
- Kajaste, R. & Hurme, M. (2016). Cement industry greenhouse gas emissions-management options and abatement cost. *Journal of cleaner production*, 112, 4041-4052. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055>
- Kesicki, F. & Anandarajah, G. (2011). The role of energy-service demand reduction in global climate change mitigation: Combining energy modelling and decomposition analysis. *Energy Policy*, 39(11), 7224-7233. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.043>
- Kesicki, F. (2013). Marginal Abatement Cost Curves: Combining Energy System Modelling and Decomposition Analysis. *Environ Model Assess*, 18, 27-37. <https://doi.org/10.1007/s10666-012-9330-6>
- Khaqqi, K. N., Sikorski, J. J., Hadinoto, K., & Kraft, M. (2018). Incorporating seller/buyer reputation-based system in blockchain-enabled emission trading application. *Applied energy*, 209, 8-19. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.070>
- Kiuila, O. & Rutherford, T. F. (2013a). The cost of reducing CO₂ emissions: integrating abatement technologies into economic modeling. *Ecol. Econ.* 87, 62e71. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.070>
- Kiuila, O., Rutherford, T.F. (2013b). Piecewise smooth approximation of bottom-up abatement cost curves. *Energy Econ.* 40, 734-742. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.07.016>
- Lameh, M., Al-Mohannadi, D. M., & Linke, P. (2022). Minimum marginal abatement cost curves (Min-MAC) for CO₂ emissions reduction planning. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(1), 143-159. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02095-y>
- Lu, N., Tian, H., Fu, B., Yu, H., Piao, S., Chen, S., ... & Smith, P. (2022). Biophysical and economic constraints on China's natural climate solutions. *Nature Climate Change*, 12(9), 847-853. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01432-3>
- Markandya, A., Sampedro, J., Smith, S.J., Van Dingenen, R., Pizarro-Irizar, C., Arto, I. and González-Eguino, M. (2018). Health co-benefits from air pollution and mitigation costs of the Paris Agreement: a modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 2(3), e126-e133. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(18\)30029-9](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30029-9)
- McKittrick, R. (1999). A derivation of the marginal abatement cost curve. *J. Environ. Econ. Manag.* 37, 306e314. <https://doi.org/10.1006/jem.1999.1065>
- Mekaroonreung, M. & Johnson, A. L. (2014). A nonparametric method to estimate a technical

CC BY 4.0
DEED
Attribution 4.0
International

- change effect on marginal abatement costs of US coal power plants. *Energy economics*, 46, 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.08.027>
- Pacca, S. A. (2018). Estudo de baixo carbono para a indústria do estado de São Paulo de 2014 a 2030: relatório síntese. Recuperado de <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/handle/123456789/2375>
- Pagani, R. N., Kovaleski, J. L., Resende, L. M. (2015). Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. *Scientometrics*. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1744-x>
- Pagani, R. N., Pedroso, B., dos Santos, C. B., Picinin, C. T., & Kovaleski, J. L. (2023). Methodi Ordinatio 2.0: revisited under statistical estimation and presenting Flnder and RankIn. *Quality & Quantity*, 57(5), 4563-4602. <https://doi.org/10.1007/s11135-022-01562-y>
- Paroussos, L., Mandel, A., Fragkiadakis, K., Frakos, P., Hinkel, J., & Vrontisi, Z. (2019). Climate clubs and the macro-economic benefits of international cooperation on climate policy. *Nature Climate Change*, 9(7), 542-546. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0501-1>
- Pietzcker, R. C., Osorio, S., & Rodrigues, R. (2021). Tightening EU ETS targets in line with the European Green Deal: Impacts on the decarbonization of the EU power sector. *Applied Energy*, 293, 116914. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116914>
- Realmonte, G., Drouet, L., Gambhir, A., Glynn, J., Hawkes, A., Köberle, A. C., & Tavoni, M. (2019). An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways. *Nature communications*, 10(1), 3277. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10842-5>
- Reis, L. A., Drouet, L., & Tavoni, M. (2022). Internalising health-economic impacts of air pollution into climate policy: a global modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 6(1), e40-e48. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00259-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00259-X)
- Riahi, K., Kriegler, E., Johnson, N., Bertram, C., Den Elzen, M., Eom, J., ... & Edenhofer, O. (2015). Locked into Copenhagen pledges - implications of short-term emission targets for the cost and feasibility of long-term climate goals. *Technological Forecasting and Social Change*, 90, 8-23. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.09.016>
- Rogelj, J., McCollum, D.L., Reisinger, A., Meinshausen, M. and Riahi, K., 2013. Probabilistic cost estimates for climate change mitigation. *Nature*, 493(7430), 79-83. <https://doi.org/10.1038/nature11787>
- Rubin, E. S., Davison, J. E., & Herzog, H. J. (2015). The cost of CO₂ capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 378-400. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.018>
- Rødsæth, K. L. (2013). Capturing the least costly way of reducing pollution: a shadow price approach. *Ecological Economics*, 92, 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.04.006>
- Sands, R. D. & Schumacher, K. (2009). Economic comparison of greenhouse gas mitigation options in Germany. *Energy Efficiency*, 2, 17-36. <https://doi.org/10.1007/s12053-008-9031-9>
- Sapkota, T. B., Vetter, S. H., Jat, M. L., Sirohi, S., Shirsath, P. B., Singh, R., ... & Stirling, C. M. (2019). Cost-effective opportunities for climate change mitigation in Indian agriculture. *Science of the Total Environment*, 655, 1342-1354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.225>
- Schmidt, T. S., Born, R., & Schneider, M. (2012). Assessing the costs of photovoltaic and wind power in six developing countries. *Nature Climate Change*, 2(7), 548-553. <https://doi.org/10.1038/nclimate1490>
- Selvakumaran, S., Limmeechokchai, B., Masui, T., Hanaoka, T., & Matsuoka, Y. (2014). Low carbon society scenario 2050 in Thai industrial sector. *Energy Conversion and Management*, 85, 663-674. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.040>
- Shapiro, J. S. & Walker, R. (2018). Why is pollution from US manufacturing declining? The roles of environmental regulation, productivity, and trade. *American Economic Review*, 108(12), 3814-3854. <https://www.aeaweb.org/articles/pdf/doi/10.1257/aer.20151272>
- Shindell, D., Kuylenstierna, J.C., Vignati, E., van Dingenen, R., Amann, M., Klimont, Z., Anenberg, S.C., Muller, N., Janssens-Maenhout, G., Raes, F. and Schwartz, J., 2012. Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security. *Science*, 335(6065), 183-189. <https://doi.org/10.1126/science.1210026>
- Stehfest, E., Bouwman, L., Van Vuuren, D. P., Den Elzen, M. G., Eickhout, B., & Kabat, P. (2009). Climate benefits of changing diet. *Climatic change*, 95(1-2), 83-102. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9534-6>
- Sternberg, A. & Bardow, A. (2015). Power-to-What? Environmental assessment of energy storage systems. *Energy & Environmental Science*, 8(2), 389-400. <https://doi.org/10.1039/C4EE03051F>
- Tao, R., Umar, M., Naseer, A., & Razi, U. (2021). The dynamic effect of eco-innovation and environmental taxes on carbon neutrality target in emerging seven (E7) economies. *Journal of Environmental Management*, 299, 113525. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113525>
- Taylor S. (2012). The ranking of negative-cost emissions reduction measures. *Energy Policy*, 48, 430-438. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.071>
- Tomaschek, J. (2015). Marginal abatement cost curves for policy recommendation—A method for energy system analysis. *Energy Policy*, 85, 376-385. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.05.021>
- Ueckerdt, F., Bauer, C., Dirnachner, A., Everall, J., Sacchi, R., & Luderer, G. (2021). Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 11(5), 384-393. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7>
- Van Vuuren, D. P., Den Elzen, M. G., Lucas, P. L., Eickhout, B., Strengers, B. J., Van Ruijven, B., ... & Van



- Houdt, R. (2007). Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic change*, 81, 119-159. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9172-9>
- Van Vuuren, D. P., van der Wijst, K. I., Marsman, S., van den Berg, M., Hof, A. F., & Jones, C. D. (2020). The costs of achieving climate targets and the sources of uncertainty. *Nature Climate Change*, 10(4), 329-334. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0732-1>
- Wagner, F., Amann, M., Borken-Kleefeld, J., Cofala, J., Höglund-Isaksson, L., Purohit, P., ... & Winiwarter, W. (2012). Sectoral marginal abatement cost curves: implications for mitigation pledges and air pollution co-benefits for Annex I countries. *Sustainability Science*, 7, 169-184. <https://doi.org/10.1007/s11625-012-0167-3>
- Wang, J., Lv, K., Bian, Y., & Cheng, Y. (2017). Energy efficiency and marginal carbon dioxide emission abatement cost in urban China. *Energy Policy*, 105, 246-255. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.039>
- Wang, K. & Wei, Y. M. (2014). China's regional industrial energy efficiency and carbon emissions abatement costs. *Applied Energy*, 130, 617-631. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.010>
- Wang, K., Wang, C., & Chen, J. (2009). Analysis of the economic impact of different Chinese climate policy options based on a CGE model incorporating endogenous technological change. *Energy policy*, 37(8), 2930-2940. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.023>
- Wang, T., Jiang, Z., Zhao, B., Gu, Y., Liou, K. N., Kalandiyur, N., ... & Zhu, Y. (2020). Health co-benefits of achieving sustainable net-zero greenhouse gas emissions in California. *Nature Sustainability*, 3(8), 597-605. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0520-y>
- Wang, Z. & Zhu, Y. (2020). Do energy technology innovations contribute to CO₂ emissions abatement? A spatial perspective. *Science of the Total Environment*, 726, 138574. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138574>
- West, J. J., Smith, S. J., Silva, R. A., Naik, V., Zhang, Y., Adelman, Z., ... & Lamarque, J. F. (2013). Co-benefits of mitigating global greenhouse gas emissions for future air quality and human health. *Nature climate change*, 3(10), 885-889. <https://doi.org/10.1038/nclimate2009>
- Xie, R., Fang, J., & Liu, C. (2017). The effects of transportation infrastructure on urban carbon emissions. *Applied Energy*, 196, 199-207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.020>
- Yang, X., Nielsen, C. P., Song, S., & McElroy, M. B. (2022). Breaking the hard-to-abate bottleneck in China's path to carbon neutrality with clean hydrogen. *Nature Energy*, 7(10), 955-965. <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01114-6>
- Yuan J. & Ng, S. H. (2017). Emission reduction measures ranking under uncertainty. *Applied Energy*, 15(188), 270-9. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.109>
- Zhang, S., Ma, M., Li, K., Ma, Z., Feng, W., & Cai, W. (2022). Historical carbon abatement in the commercial building operation: China versus the US. *Energy Economics*, 105, 105712. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105712>
- Zhang, Shihui., An, K., Li, J., Weng, Y., Zhang, S., Wang, S., ... & Gong, P. (2021). Incorporating health co-benefits into technology pathways to achieve China's 2060 carbon neutrality goal: a modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 5(11), e808-e817. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00252-7](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00252-7)
- Zhang, X., Gu, B., van Grinsven, H., Lam, S. K., Liang, X., Bai, M., & Chen, D. (2020). Societal benefits of halving agricultural ammonia emissions in China far exceed the abatement costs. *Nature communications*, 11(1), 4357. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18196-z>
- Zheng, J., Chien, A. A., & Suh, S. (2020). Mitigating curtailment and carbon emissions through load migration between data centers. *Joule*, 4(10), 2208-2222. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.08.001>
- Zhou, Y., Bao, M., Chen, X., & Xu, X. (2016). Co-op advertising and emission reduction cost sharing contracts and coordination in low-carbon supply chain based on fairness concerns. *Journal of Cleaner Production*, 133, 402-413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.097>