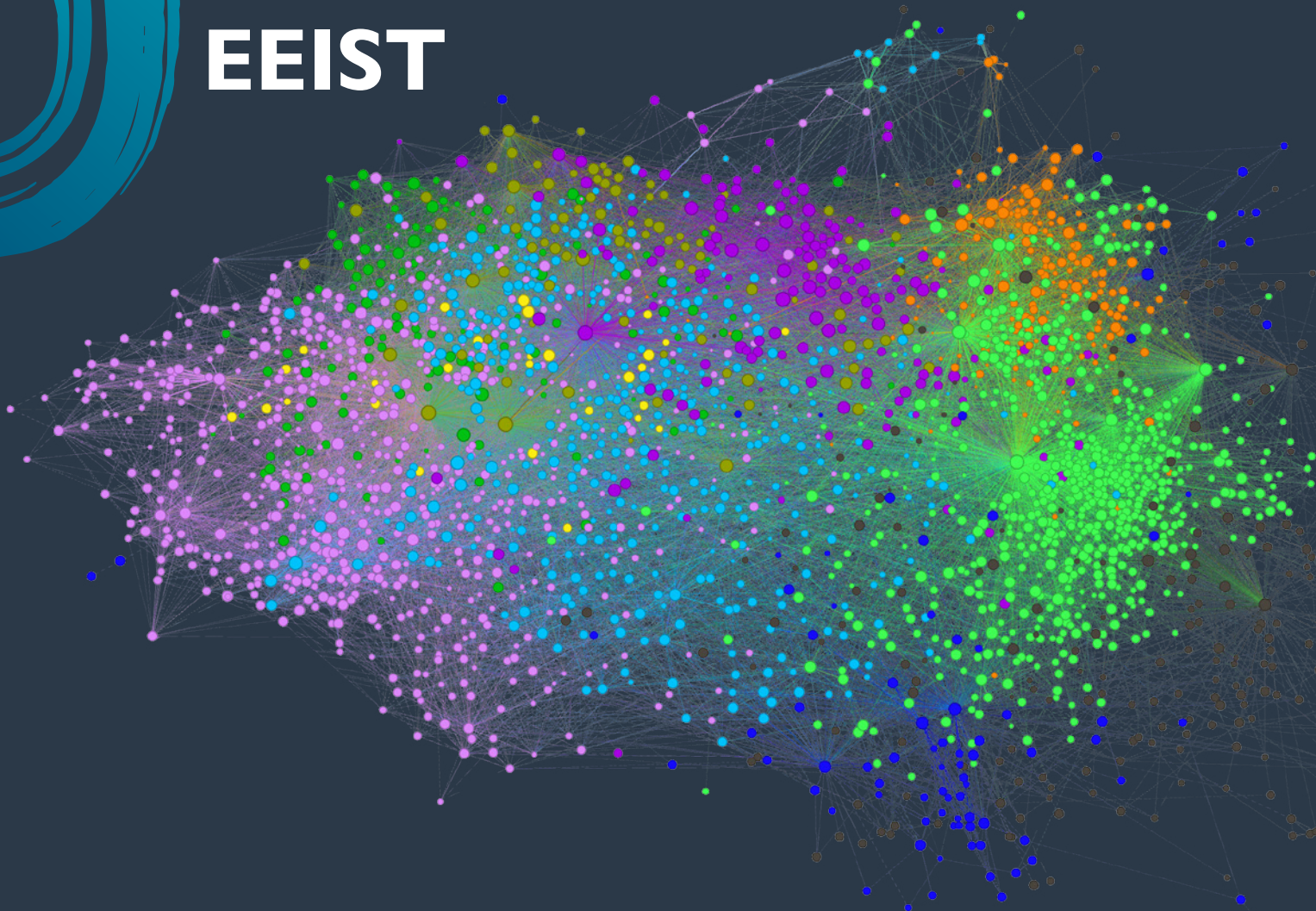




EEIST

NOVOS MODELOS ECONÔMICOS SOBRE INOVAÇÃO E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA:

COMO ABORDAR NOVAS QUESTÕES E FORNECER RESPOSTAS MELHORES

AUTORES PRINCIPAIS: PETE BARBROOK-JOHNSON, SIMON SHARPE, ROBERTO PASQUALINO, FERNANDA SENRA DE MOURA, FEMKE NIJSEE, PIM VERCOULEN, ALEX CLARK, CRISTINA PEÑASCO, LAURA DIAZ ANADON, JEAN-FRANCOIS MERCURE, CAMERON HEPBURN, J. DOYNE FARMER E TIMOTHY M. LENTON



Conteúdo

SUMÁRIO EXECUTIVO	4	CASE STUDIES OF NEW ECONOMIC MODELLING APPLICATIONS	34	Impactos da Transição Energética		CONCLUSÃO	
DESTAQUES DE POLÍTICA	8			Modelando transições no mercado de trabalho: o caso das mudanças de produtividade no Brasil	120	Resumo dos principais achados dos estudos de caso	177
INTRODUÇÃO	16	Transição Energética Global		A China e as consequências sociais da transição do carvão	128	Temas e lições	178
A chamada para a mudança	16	Projeção de custos das tecnologias de energia com base em evidências empíricas	38			O futuro da nova modelagem econômica	179
Cumprindo a promessa de uma nova modelagem econômica	18	Opções de políticas para descarbonização rápida e suave e o crescimento sustentável	46	Planos nacionais de descarbonização		APÊNDICE	
A quem se destina este relatório – e como lê-lo	19	Setores de energia e indústria		Impactos econômicos da economia de emissão zero na Índia em 2070	134	Exemplos de requisitos de dados para novos modelos econômicos	180
O que há no restante deste relatório?	19	Renováveis imparáveis e preços marginais na China, Índia e Brasil	52	Descarbonizando a economia indiana: políticas e impactos	142	Qual é a Forma mais econômica de precificação do carbono? modelando o mercado de emissões e a taxação de carbono em geral e na China	180
ABORDANDO AS PRINCIPAIS QUESTÕES DE POLÍTICA ENERGÉTICA E CLIMÁTICA		Modelando o desenvolvimento setorial combinado de hidrogênio e amônia na Índia	62	Mapeamento de sistemas orientados a dados de ODS e interações de transição energética	150		
Tipos de questões sobre política	20	Qual é a forma mais econômica de precificação de carbono? modelando o mercado de emissões e a taxação de carbono em geral e na China	70	A complexidade verde e a competitividade das exportações da China	156		
Onde estamos no ciclo político?	22	Transporte		Finanças			
Quão claras são as questões políticas?	23	Ativando Pontos de Inflexão de Veículos Elétricos na China, Índia, Europa e EUA	88	Preenchendo a lacuna do financiamento verde no Reino Unido: transição para eletricidade de baixo carbono e implicações econômicas	162		
O QUE SÃO OS “NOVOS MODELOS ECONÔMICOS”?		Agricultura		Opções de saída para investimentos em energia renovável no Brasil	168		
O que é “novo”?	24	Apoiando a expansão da agricultura sustentável: uma abordagem usando modelo baseado em agente	112				
Diferentes tipos de modelos	24						
COMO ESCOLHER E USAR NOVOS MODELOS ECONÔMICOS							
Escolhendo a abordagem de modelagem mais apropriada	28						
Refletindo sobre previsão, previsão e validação empírica	31						
Como começar a usar essas abordagens	31						

AUTORES COLABORADORES: AUTORES DOS ESTUDOS DE CASO LISTADOS EM CADA ESTUDO

Cover image: Occupational mobility network. Full version can be found on page 122.

Sobre

O projeto “Economia da Inovação Energética e Transição do Sistema” (Economics of Energy Innovation and System Transition – EEIST) desenvolve análises de inovação energética de ponta para apoiar a tomada de decisão do governo envolvendo a inovação de baixo carbono e a mudança tecnológica.

Ao se engajar com formuladores de políticas e stakeholders no Brasil, China, Índia, Reino Unido e UE, o projeto visa contribuir para o desenvolvimento econômico de nações emergentes e apoiar o desenvolvimento sustentável em escala global.

Liderado pela Universidade de Exeter, o Projeto EEIST reúne uma equipe internacional de instituições de pesquisa líderes mundiais no Brasil, China, Índia, Reino Unido e União Europeia.

O consórcio de instituições compreende as seguintes entidades.

No Reino Unido: Universidade de Exeter, Universidade de Oxford, Universidade de Cambridge, University College London, Universidade Anglia Ruskin, Cambridge Econometrics e Climate Strategies. **Na Índia:** Instituto de Energia e Recursos e Instituto de Recursos Mundiais. **Na China:** Universidade de Tsinghua e Instituto de Pesquisa de Energia. **No Brasil:** Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade de Brasília, Universidade Estadual de Campinas. **Na União Europeia:** Scuola Superiore di Studi Universitari e di Perfezionamento.

Financiadores

O Projeto EEIST é financiado por meio do programa UK Aid do Departamento para Segurança Energética e Zero Líquido (Department for Energy Security and Net Zero) do Governo do Reino Unido e a Fundação do Fundo de Investimento para Crianças (Children’s Investment Fund Foundation – CIFF). Os autores deste estudo são ligados a diversas instituições.

Para conhecer as afiliações institucionais completas, consulte www.eeist.co.uk

O conteúdo deste relatório representa os pontos de vista dos autores e não representa os pontos de vista do governo do Reino Unido, da CIFF, das organizações às quais os autores são afiliados ou de qualquer uma dos financiadores.

Acknowledgements

The authors wish to thank the UK Department for Energy Security & Net Zero, the Children’s Investment Fund Foundation (CIFF), the Quadrature Climate Foundation and Founders’ Pledge for their support as sponsors of the EEIST project. We also wish to thank all those who contributed their time and expertise to developing and refining the analysis, concepts and ideas presented in this report, and in bringing it to publication. This includes, but is not limited to: Jacqui Richards and individuals from the Communities of Practice in EEIST partner countries, the EEIST Senior Oversight Group, and the UK government.

Sumário executivo

Este relatório se propõe a mostrar o valor de novas modelagens econômicas na abordagem a questões políticas relevantes para a transição rumo a uma economia de baixo carbono. Por meio de 15 estudos de caso reais, com foco global, regional e nacional, elaborados em parceria com stakeholders políticos, este relatório mostra como novas abordagens de modelagem econômica podem fornecer informações cruciais para a tomada de decisão, além de trazer orientações sobre como avaliar, selecionar e aplicar diferentes tipos de modelagem para esse fim.

Precisamos de uma nova geração de modelos econômicos para apoiar o desenho de políticas bem-sucedidas de promoção da transição energética. Geralmente, os governos usam modelos de equilíbrio geral nos quais, sem choques externos, a economia é estável e os atores não têm motivos para mudar suas estratégias. Esse tipo de modelo pode ser adequado para lidar com algumas questões políticas, mas não todas. Quando se trata de processos dinâmicos, em que há mudança de estado, esses modelos não são apropriados. A descarbonização requer transições de sistema nos diversos setores emissores da economia – contexto em que vários atores têm fortes

razões para mudar de estratégia, novas tecnologias surgem e a estrutura dos mercados muda. Embora os modelos de equilíbrio permaneçam importantes – por exemplo, para responder a perguntas do tipo “como seria uma economia de zero líquido?” – os modelos de desequilíbrio são importantes como ferramenta complementar, particularmente para responder a perguntas do tipo “como vamos chegar lá?”.

Novos modelos podem ajudar a identificar as políticas que impulsionarão a descarbonização da economia. Em geral, os modelos que simulam os processos de mudança na economia chegam a diferentes respostas para as questões de política, enquanto outros modelos calculam e comparam os estados da economia em pontos específicos no tempo. Os estudos de caso contidos neste relatório apresentam uma série de novos modelos e revelam um conjunto de descobertas importantes sobre quatro tipos de questões políticas, usando para isso diferentes métodos, com foco em diferentes países: Brasil, China, Índia e Reino Unido. A Tabela A resume os principais resultados dos estudos de casos, com outros exemplos fornecidos na seção de destaques da política mais adiante.

Tabela A: Questões políticas abordadas e principais resultados encontrados

Questões políticas	Principais resultados
Direção do desenvolvimento: Devemos descarbonizar? Quanto isso vai custar? Quais serão os impactos macroeconômicos?	• Vários estudos de caso, com foco em diferentes países e usando métodos diferentes, concluíram que a descarbonização provavelmente proporcionará criação líquida de empregos e pode levar ao crescimento da economia como um todo, dependendo das estruturas econômicas específicas das regiões de interesse. • A velocidade da transição deve ser preferencialmente mais rápida do que a atualmente prevista. • Podem ocorrer impactos ou custos negativos em determinados cenários de transição e é possível identificar os períodos, setores ou ocupações em que eles venham a ocorrer, bem como as conexões com outros objetivos de desenvolvimento.
Escolhas tecnológicas: Em quais tecnologias devemos nos concentrar? Quais serão os impactos setoriais?	• Os formuladores de políticas devem minimizar as barreiras às tecnologias de emissão zero cujo desempenho melhora e custos reduzem em função de sua adoção mais ampla. Isso inclui energia solar, eólica, eletrolisadores e baterias. Os formuladores de políticas devem moldar os mercados para fomentar a inovação e acelerar o crescimento dessas tecnologias. • Diferentes países terão de focar em diferentes tecnologias, dependendo de sua situação atual. • O abandono das tecnologias de combustíveis fósseis pode ter impactos previsíveis e gerenciáveis, dependendo da natureza da transição.
Escolhas de políticas: Quais são as melhores políticas para apoiar nossos objetivos?	• Investir em tecnologias de emissão zero tende a ser mais eficaz do que precificar os combustíveis fósseis para alcançar a redução das emissões e fomentar a inovação das principais tecnologias energéticas. • A regulação pode ser altamente eficaz como meio de promover a realocação de investimentos em tecnologias de emissão zero, acelerando sua melhoria e a redução de custos. • Cotas para determinadas tecnologias (<i>technology mandates</i>) ou compras governamentais são políticas eficazes para alavancar as indústrias e aumentar a eficácia de outras políticas. • A precificação do carbono pode ser útil se fizer parte de um pacote de políticas (mais ainda quando implementada como um tributo e não parte de um sistema <i>cap-and-trade</i>). • O timing da política é fundamental, uma vez que o apoio tardio aumenta as chances de um lock-in indesejado.
Formulação da política: Como devemos desenhar a política?	• Subsídios ou impostos podem ser particularmente eficazes quando estabelecidos em um nível que torna o custo de uma tecnologia de emissão zero competitivo em relação aos combustíveis fósseis. • As regulações podem ser mais efetivas quando exigem a adoção de uma tecnologia de emissão zero do que quando exigem o aumento da eficiência dos combustíveis fósseis (embora a combinação das duas coisas seja melhor). • O comércio de emissões precisa ser projetado para evitar que se freie a redução de emissões nos casos em que o progresso rápido supera os ajustes no fornecimento de permissões.

Novos modelos podem fornecer mais informações sobre as transições de baixo carbono.

Além permitir a escolha de um mix de tecnologias ou instrumentos de política para a implantação de tecnologias limpas, a nova geração de modelos também pode fornecer informações sobre aspectos sociais, ambientais e macroeconômicos mais amplos da transição. Podem também ajudar a lidar com questões envolvendo, por exemplo, onde vão se ganhar ou perder empregos, que lacunas de qualificação vão surgir na força de trabalho, como a transição pode afetar a balança comercial e como substituir as receitas fiscais dos combustíveis fósseis.

Temos uma nova geração de modelos disponível. Os estudos de caso usam uma variedade de abordagens de modelagem, incluindo: (i) métodos de análise de dados, como mapeamento de sistemas e complexidade econômica; (ii) modelos macroeconômicos, tais como o Modelo Macroeconômico de Energia-Ambiente-Economia (*Energy-Environment-Economy Macro-Econometric Model* - E3ME) e extensões evolucionárias setoriais; (iii) modelos econômicos detalhados de dinâmica de sistemas; (iv) modelos empíricos baseados em agente; e (v) modelos de sistemas de energia estendidos. Essa pluralidade é importante para garantir que não vamos depender de um único tipo de modelagem. Essas abordagens têm em comum se basearem no pressuposto de que a economia está em processo de mudança e simularem esses processos de forma que eles sejam compreendidos e influenciados pela política. Além disso, essas abordagens empregam técnicas de modelagem do tipo *bottom-up*, realistas do ponto de vista estrutural e validadas empiricamente. Dessa forma, conseguem entregar os resultados prometidos há 20 ou 30 anos.

Dessa diversidade de métodos e questões políticas emergem duas lições metodológicas. Primeiro, é muito importante quando acadêmicos, analistas e formuladores de políticas cooperam e interagem para desenvolver modelos e analisar questões políticas reais; esse modo de trabalhar produz resultados valiosos e aumenta a capacidade para usar novos modelos econômicos. Em segundo lugar, fica claro o valor da análise e da avaliação detalhada de políticas, com os tomadores de decisão exigindo uma representação mais elaborada das políticas e sua implementação em modelos.

Há um muito espaço para novas melhorias na modelagem econômica, que podem vir de avanços em três frentes:

1. **Aprender o que funciona na prática:** Quanto mais aplicações dessas novas formas de modelagem existirem, mais se gera aprendizado sobre o que funciona e como analistas e tomadores de decisão podem usar esses métodos e aprimorar suas capacidades.
2. **Desenvolver ferramentas de pensamento poderosas:** O uso de novos modelos econômicos apoiará e será apoiado pelo desenvolvimento adicional da teoria econômica sobre processos de inovação e mudança estrutural, desde os “Dez Princípios para Formulação de Políticas na Transição Energética” descritos no relatório anterior deste projeto, até conceitos oriundos da experiência prática para pensar sobre tecnologia e sistemas econômicos, tais como *feedbacks*, mudanças exponenciais e pontos de inflexão.
3. **Aumentar a inovação e a transparência:** À medida que cresce a demanda por uma nova modelagem econômica, diversas inovações metodológicas devem surgir. A transparência e a clareza no desenvolvimento e no uso de modelos também devem melhorar, ampliando o uso dessas novas abordagens e acelerando o desenvolvimento de inovações.

Governos e organizações internacionais podem acelerar o surgimento e o desenvolvimento dessas novas abordagens de modelagem. Os governos são os maiores clientes dos métodos de análise de políticas; ao contratar e financiar o desenvolvimento de novos modelos, estimulam a comunidade acadêmica a investir tempo e capital intelectual nessas novas abordagens. Os governos podem melhorar sua própria capacidade institucional para usufruir dessa nova geração de modelos, treinando seus funcionários no desenvolvimento de modelos de desequilíbrio e de técnicas analíticas complementares, como o mapeamento de sistemas e a análise de risco-oportunidade.

Este relatório destina-se a um público abrangente, que inclui analistas, técnicos em modelagem, pesquisadores e acadêmicos atuando dentro de e para os governos, organizações multilaterais e o setor privado ligado à transição energética e a políticas energéticas e climáticas. Equipes envolvidas na política e tomadores de decisão também pode se interessar por este relatório, uma vez que ele resume os principais achados da nova modelagem econômica e pode ajudar os leitores a entender por que diferentes tipos de análise levam a diferentes *insights*.



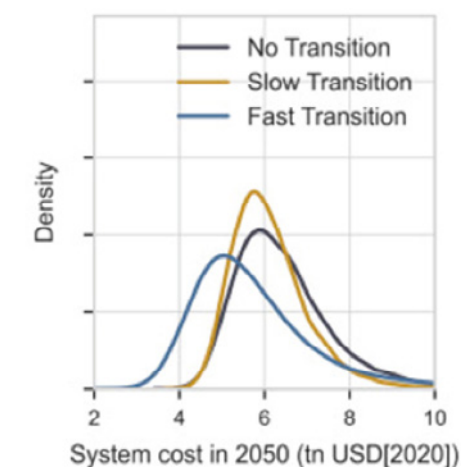
Destques de política

Aqui apresentamos os destaques das políticas abordadas nos estudos de caso que compõem este relatório. O objetivo desta seção não é fazer um resumo, mas trazer exemplos que ilustram o potencial de novos modelos econômicos para lidar com novas questões e fornecer respostas melhores para os problemas políticos relativos à inovação e à transição energética. Os leitores podem consultar os estudos de caso para encontrar mais detalhes sobre métodos, resultados, limitações e implicações políticas de cada uma dessas análises.

O ritmo da transição

O estudo de caso [Projeção de Custos das Tecnologias de Energia com Base em Evidências Empíricas](#) conclui que a transição rápida para um sistema de energia de emissão zero (incluindo os setores de energia, transporte, construção e indústria) pode custar menos do que uma transição mais lenta e, assim, economizar cerca de US\$ 12 trilhões, em termos agregados globais, comparativamente a continuar tudo como está (Figura 1). Isso é o oposto da visão tradicional, segundo a qual quanto mais se reduzirem as emissões maiores serão os custos. Essa diferença decorre do fato de nosso estudo fazer uma representação mais realista da forma como os custos das tecnologias limpas caem à medida que seu uso aumenta.

Figura 1: Previsão do custo anual do sistema em 2050.

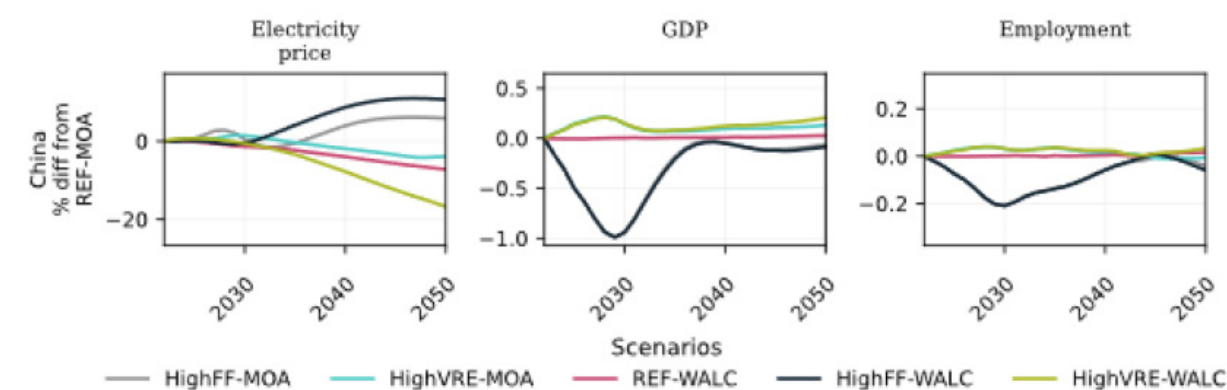


O setor de energia

O estudo de caso [Renováveis Imparáveis e Precificação Marginal](#) mostra que as escolhas envolvendo o desenho do mercado serão cruciais para aproveitar as oportunidades trazidas pela eletricidade renovável de baixo custo (Figura 2). Embora a energia solar com armazenamento possa vir a custar metade da energia a carvão até 2030 nos países analisados, o preço da eletricidade pode

ainda ficar em um patamar alto se os preços de mercado forem determinados pela unidade marginal de oferta (provavelmente ainda a ser determinada por combustíveis fósseis). Desenhos de mercado alternativos em que os preços da eletricidade refletem o custo médio ponderado nivelado (*weighted average levelised cost* - WALC) da geração de eletricidade podem levar a preços mais baixos, contribuindo para gerar emprego e crescimento econômico.

Figura 2: Comparação dos preços da eletricidade, PIB e emprego, em diferença percentual em relação ao cenário de referência (REF-MOA) na China. HighFF = Cenário de alta de combustíveis fósseis; HighVRE = Cenário de alta variável renovável; REF = Cenário de referência; MOA = abordagem de ordem de mérito; WALC = custo médio ponderado nivelado.

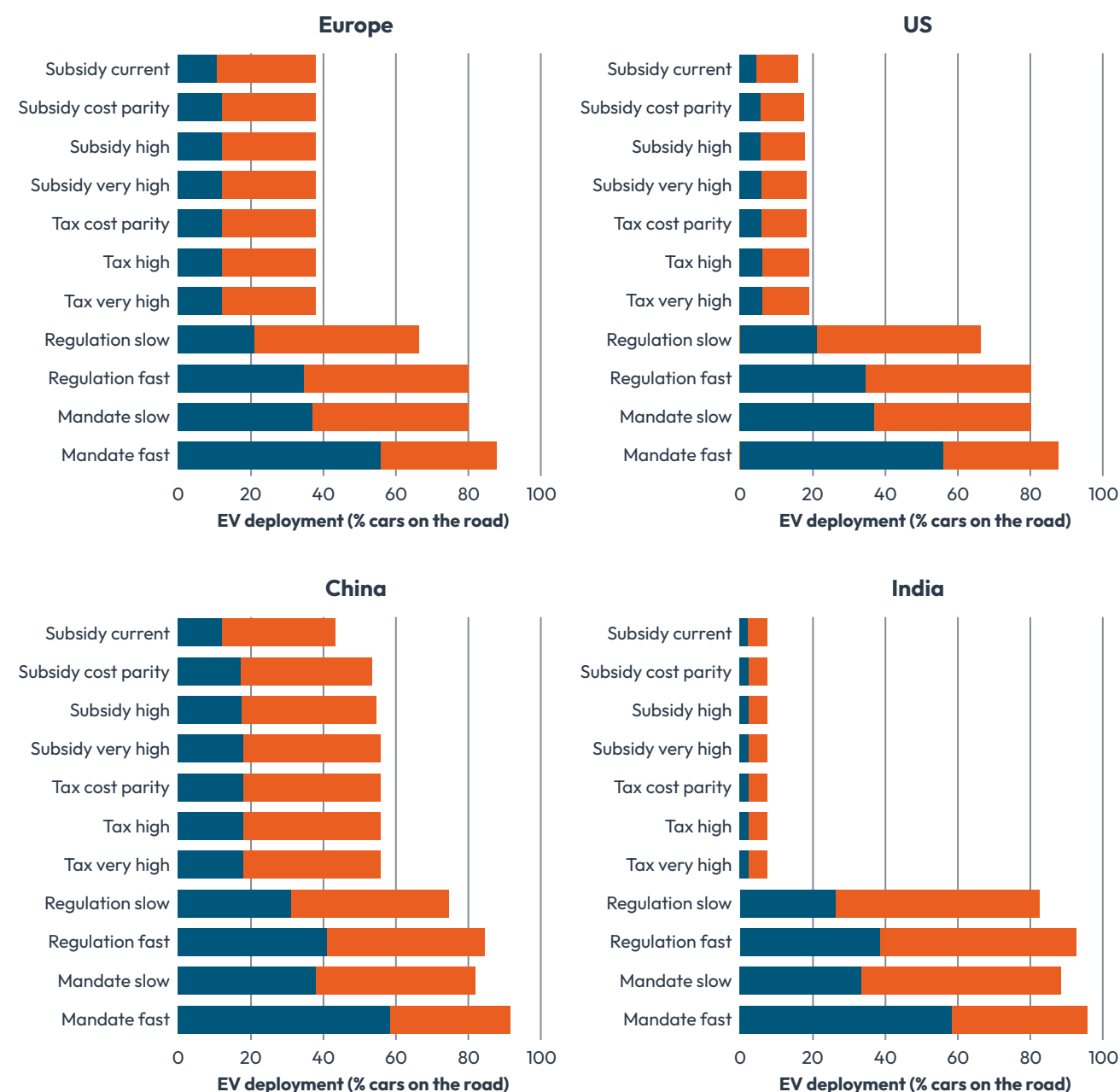


Veículos de emissão zero (zero emission vehicles – ZEVs)

O estudo de caso [Ativando Pontos de Inflexão de Veículos Elétricos na China, Índia, Europa e EUA](#) mostra como um modelo de simulação pode ser usado para comparar opções de políticas usadas individualmente e em conjunto. Descobrimos que as cotas para tecnologias de veículos de emissão zero e as regulações sobre eficiência costumam ser as políticas mais eficientes em termos de custos para conduzir a transição para veículos de emissão zero,

com subsídios sendo a próxima melhor solução e os impostos de longe a opção menos econômica (Figura 3). O estudo também descobriu que, no caso de veículos elétricos, o uso de políticas combinadas tanto pelo lado da oferta quanto pelo lado da demanda pode dar mais resultado do que a soma de suas partes, enquanto outras combinações de políticas produzem menos resultados do que a soma de suas partes. Essas descobertas só foram possíveis porque se adotou um modelo que simula resultados prováveis em vez de computar soluções “ótimas”.

Figura 3: Incentivos de política e uso de veículos elétricos (electric vehicles – EV) sob diferentes pressupostos de política.

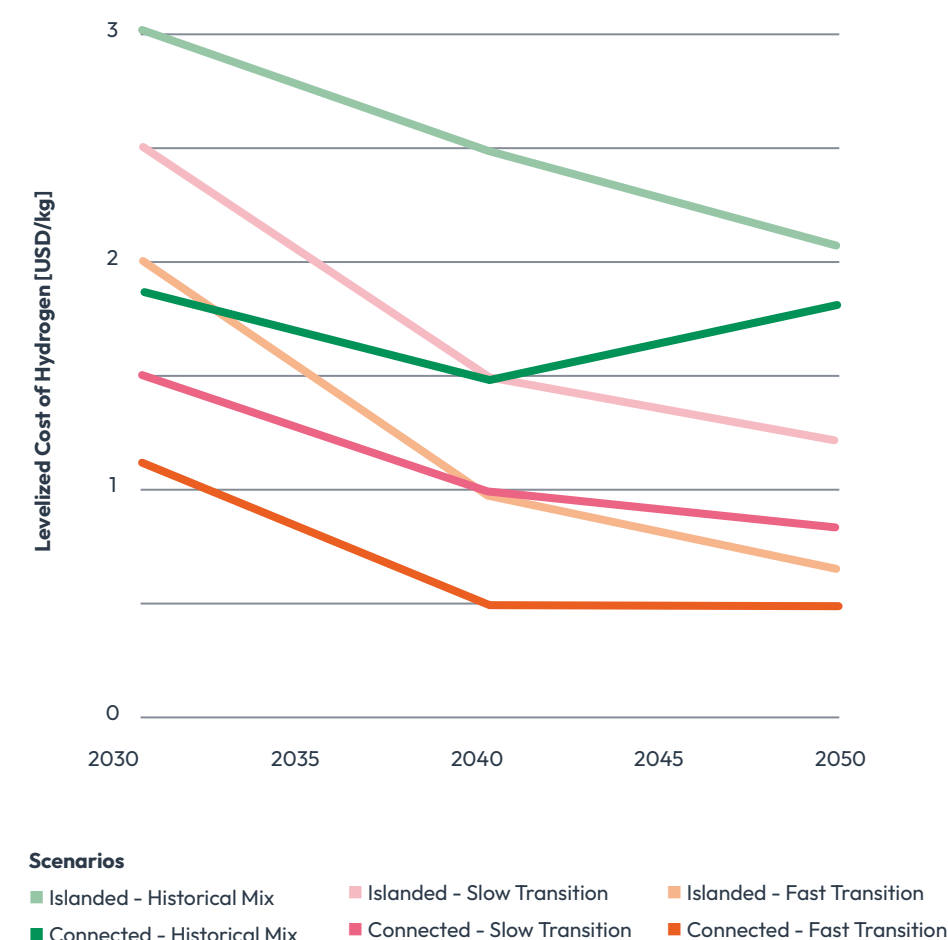


Hidrogênio nos setores de energia e na indústria

O estudo de caso [Modelando o Desenvolvimento Setorial Combinado de Hidrogênio e Amônia na Índia](#) mostra os riscos e as oportunidades decorrentes de uma escolha política sobre infraestrutura: conectar usinas de produção de hidrogênio e amônia à rede elétrica ou construí-las como usinas “separadas” conectadas apenas aos compradores industriais locais. O estudo conclui que, em comparação com a abordagem “isolada”, a abordagem “conectada” não apenas resulta na produção de hidrogênio e amônia a um custo 10-25% menor (Figura 4), mas também reduz a necessidade de capacidade de geração solar e eólica em cerca de 200-300

GW, além de trazer vantagens significativas em termos de segurança energética e resiliência do fornecimento de eletricidade face às variações climáticas. Essas descobertas surgem da exploração do modelo das interações dinâmicas entre os setores de energia e industrial: hidrogênio verde e amônia melhoram a eficiência do sistema elétrico permitindo o armazenamento de energia e facilitando a disponibilidade da energia; a eletricidade de baixo custo, por sua vez, permite a produção de hidrogênio verde e amônia de baixo custo. Escolhas políticas envolvendo, por exemplo, como pagar pelas conexões de rede das usinas de hidrogênio podem determinar qual das configurações alternativas de infraestrutura será implementada.

Figura 4: Custo nivelado do hidrogênio em vários cenários.



Agricultura e uso da terra

O estudo de caso [Apoiando a expansão da agricultura sustentável: uma abordagem usando modelo baseado em agente](#) conclui que, sem uma intervenção política significativa, a competição entre os agricultores por rentabilidade no curto prazo e participação no mercado provavelmente levará à degradação do solo, com sérios riscos para a segurança alimentar no longo prazo. Conclui-se que dar aos agricultores melhor acesso a informações sobre práticas sustentáveis – e incentivar a adoção de novas tecnologias – pode aumentar significativamente as chances de o sistema agrícola fazer uma transição para a sustentabilidade (Figura 5). É importante ressaltar que os resultados sugerem que as intervenções políticas têm mais chance de serem eficazes se introduzidas no início da transição; se deixar para depois, as diferenças do desenvolvimento tecnológico podem tornar impossível evitar um *lock-in* em práticas agrícolas não sustentáveis. Essas descobertas só foram possíveis porque se adotou um modelo no qual os agricultores são representados como atores econômicos com diversos recursos e conhecimentos, atuando em um contexto de incerteza, cujas ações influenciam o mercado e são também influenciadas por ele.

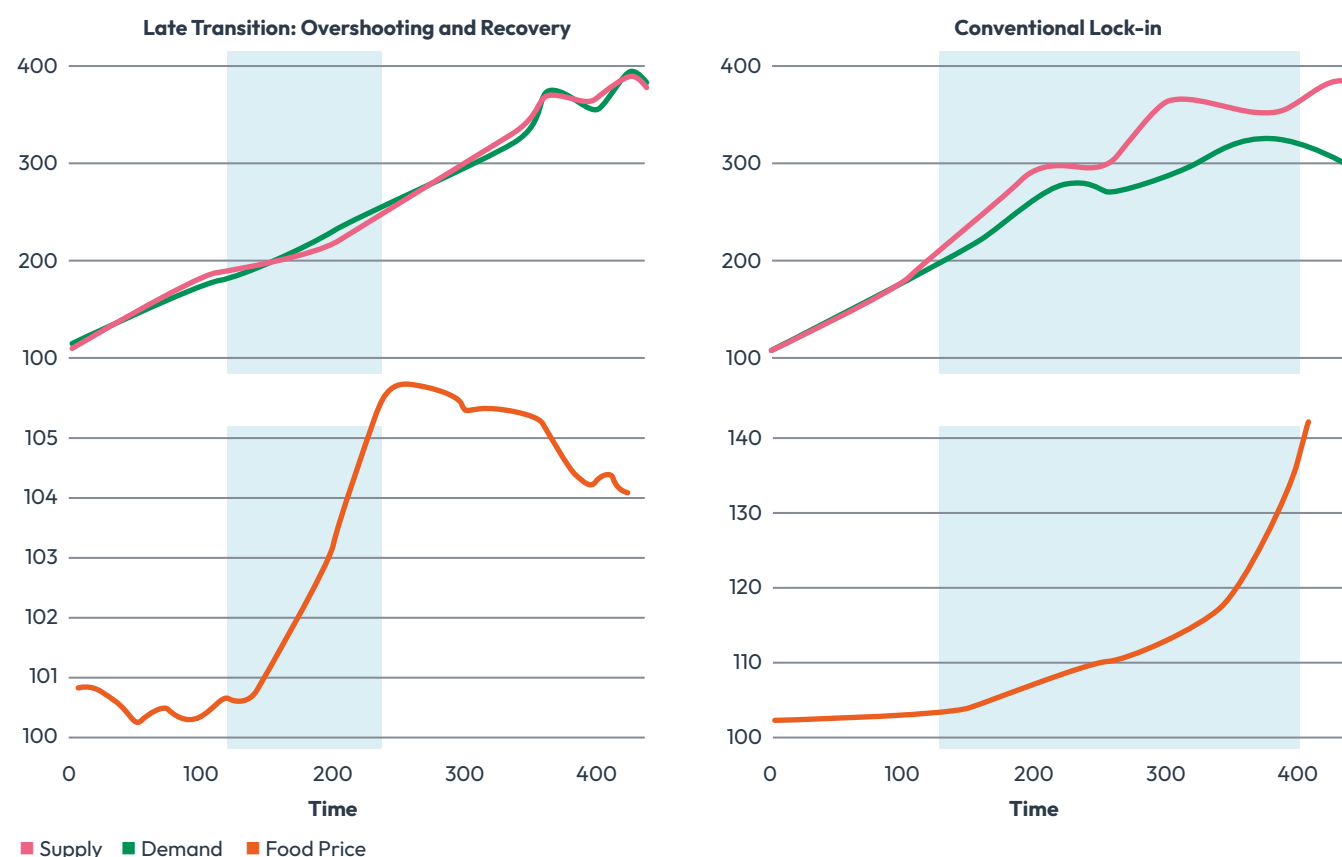


Figura 5: Três simulações diferentes com os principais tipos de dinâmicas observadas: transição rápida para agricultura sustentável, ultrapassagem (ou transição tardia) e lock-in convencional. Para cada simulação, são mostradas a distância entre a demanda e a oferta totais e a dinâmica dos preços dos alimentos. O eixo X representa o tempo, enquanto o eixo Y representa as alterações em relação aos valores iniciais (em escala de 100). As áreas vermelhas correspondem a períodos de alimentação insuficiente.

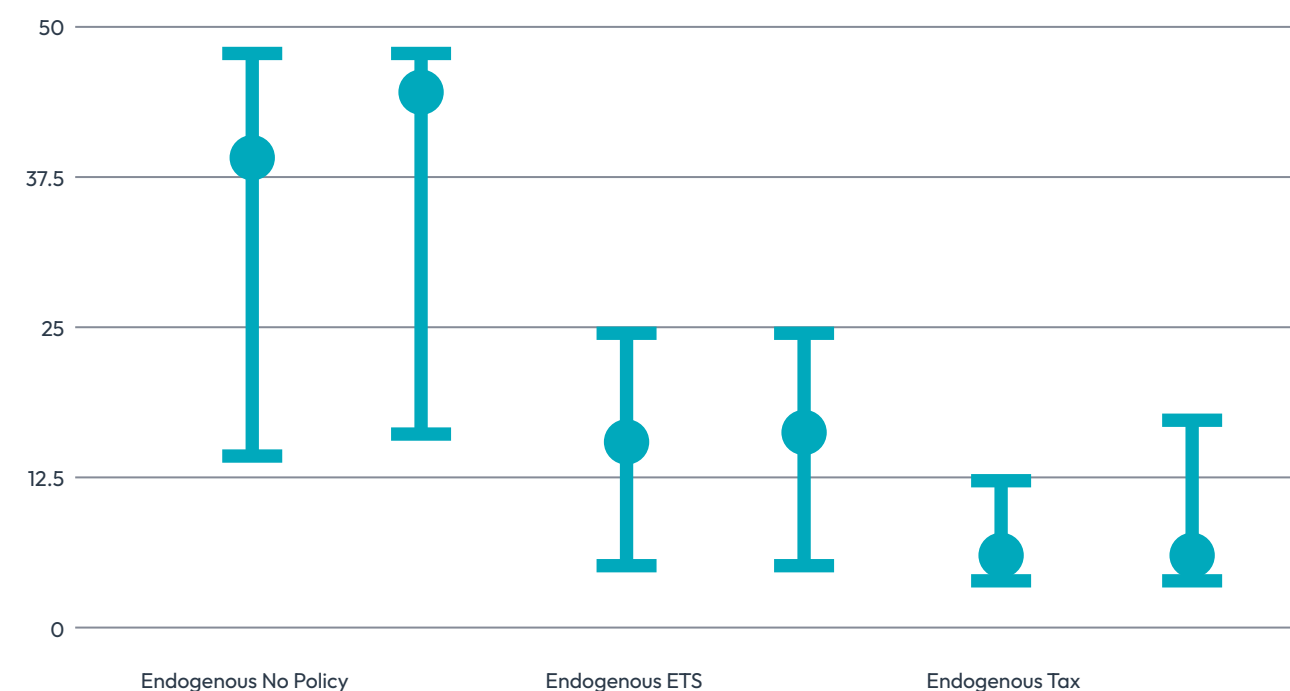
Precificação do carbono

Em um relatório anterior¹, observamos que a visão tradicional de que a precificação do carbono é a maneira mais econômica de apoiar a descarbonização depende da suposição de equilíbrio e que isso está em desacordo com a realidade em que a transição para uma economia de baixo carbono envolve processos de inovação e mudança estrutural. O estudo de caso [Opções de Política para Descarbonização Rápida E Suave e o Crescimento Sustentável](#) analisa a precificação do carbono de uma perspectiva global. Conclui que, quando usado sozinho como um instrumento de política, a precificação do carbono num nível baixo de preços é ineficaz para promover uma transição consistente com a meta de limitar o aumento da temperatura a 2° C, e que precificação do carbono num nível alto que seja consistente com esse objetivo pode levar à instabilidade econômica, gerando desemprego, falências e recessão. O estudo sugere que uma combinação de políticas, incluindo subsídios e

regulações, pode ser mais eficaz para promover o crescimento econômico sustentável.

O estudo de caso [Qual é a Forma Mais Econômica de Precificação de Carbono? Modelando o Mercado de Emissões e a Taxação de Carbono em Geral e na China](#) conclui que, ao contrário da visão tradicional, as duas formas mais comuns de precificação do carbono – a taxa e um mercado de emissões (*emission trading scheme* - ETS) – não são equivalentes em termos de custo-benefício. Nosso modelo conclui que, para o mesmo nível de preço do carbono, a taxa provavelmente promoverá uma redução de emissões de forma muito mais rápida do que um ETS (Figura 6). A diferença entre essas opções políticas também depende significativamente da estrutura dos mercados aos quais são aplicadas. Essas descobertas só são possíveis devido ao uso de modelos e técnicas que não assumem o equilíbrio e, em vez disso, exploram as interações dinâmicas de políticas, tecnologias, empresas e mercados.

Figura 6: Tempo (mostrando mínima, máxima e média) para chegar a zero emissões nas simulações (em anos). As barras horizontais indicam o valor médio de várias simulações com cada cenário.



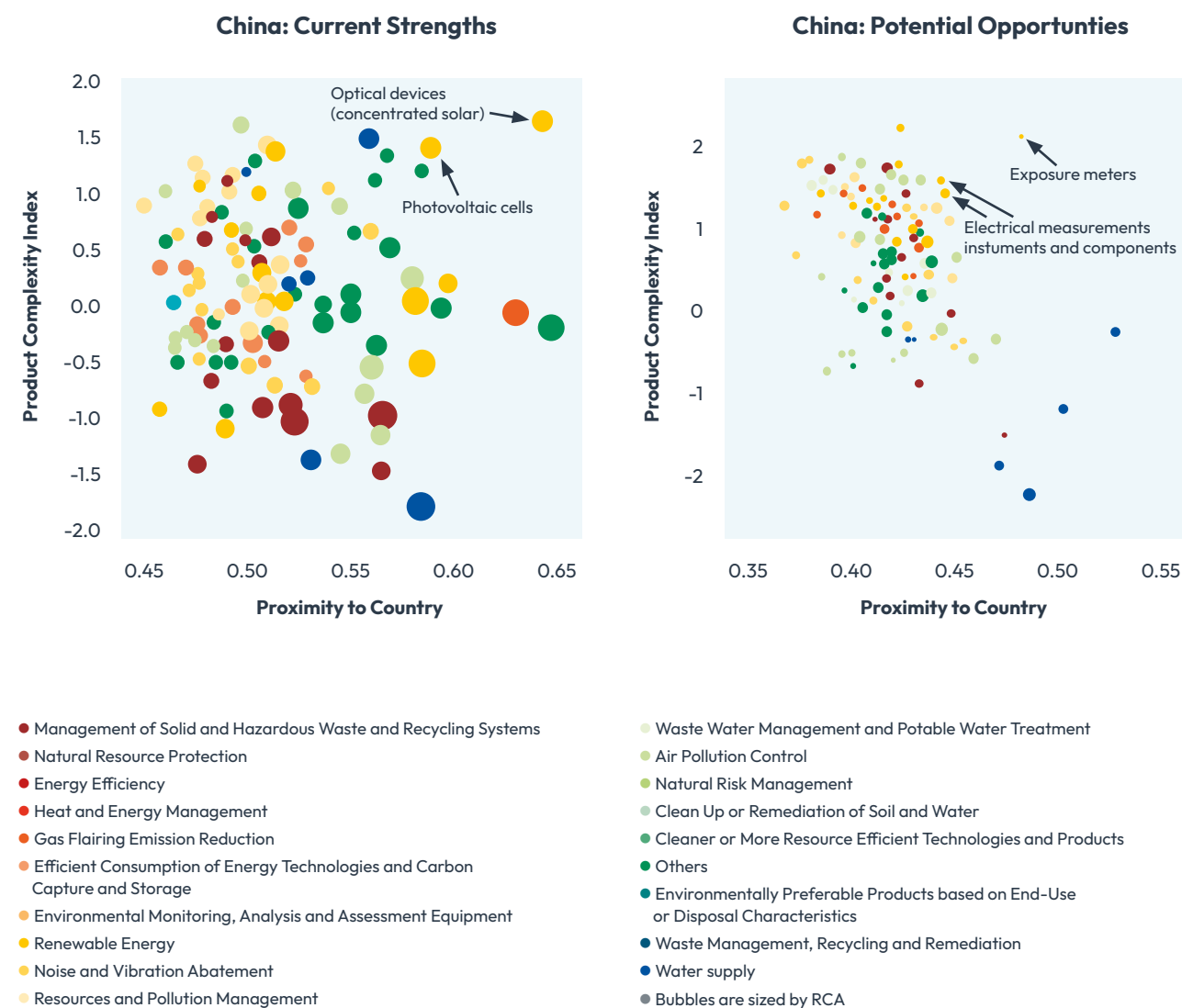
¹Díaz-Anadón et al. (2022). Ten Principles for Policymaking in the Energy Transition: Lessons from experience.

Competitividade industrial

O estudo de caso [A Complexidade Verde e a Competitividade das Exportações da China](#) mostra como compreender a estrutura de diferentes produtos interrelacionados na economia com base em padrões comerciais pode ajudar a prever novas áreas nas quais um país pode ganhar

competitividade industrial (Figura 7). Descobrimos que a competitividade da China em tecnologias limpas é maior do que sua competitividade geral da indústria, que o país recentemente se tornou competitivo na exportação de veículos elétricos e ainda pode aumentar sua competitividade em áreas como as tecnologias de monitoramento ambiental.

Figura 7: Produtos de exportação verdes da China divididos em pontos fortes (esquerda) e oportunidades potenciais (direita). O tamanho do círculo do produto indica a atual vantagem comparativa revelada da China; cores representam categorias de produtos.

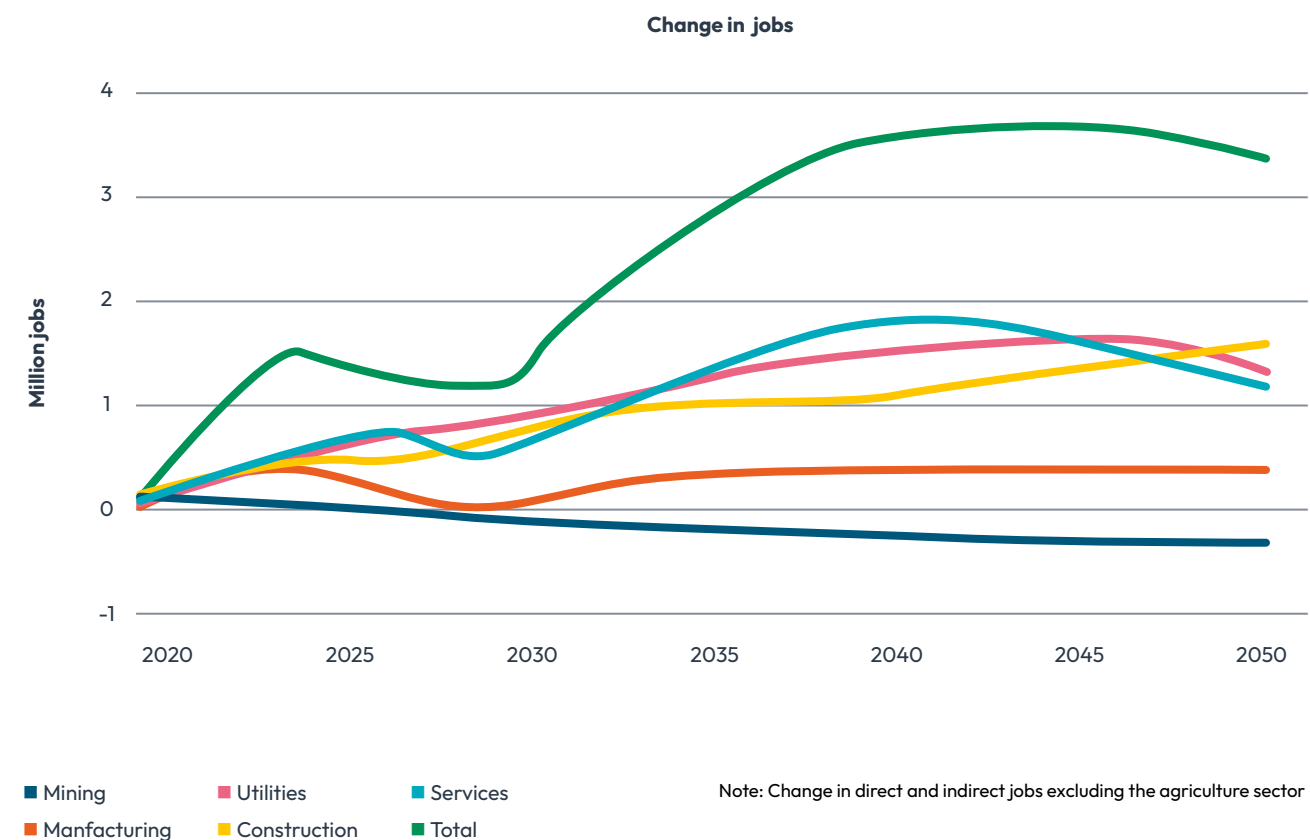


Empregos e habilidades

Os estudos de caso [Impactos Econômicos da Economia de Emissão Zero na Índia em 2070](#) e [Descarbonizando a Economia Indiana: Políticas e Impactos](#) (Figura 8) usam diferentes tipos de modelagem e concluem que a transição de baixo carbono provavelmente gerará novos empregos na Índia em comparação com um cenário em que nada seja feito. Para chegar a esse resultado, os modelos empregados não pressupõem que o investimento seja alocado nos ativos de maneira ótima e nem que os trabalhadores sejam alocados em empregos de maneira ótima em toda a economia. Em vez disso, os modelos permitem perspectivas realistas de capital improdutivo e desemprego. Embora as perdas de empregos nos setores de combustíveis fósseis provavelmente sejam substanciais, elas são mais do que compensadas pelo crescimento de empregos em setores como geração de energia, serviços e construção.

O estudo de caso [Modelando Transições no Mercado de Trabalho: O Caso das Mudanças de Produtividade no Brasil](#) aborda a capacidade das pessoas de, dependendo de suas habilidades, migrar de setores onde os empregos estão sendo destruídos para aqueles onde os empregos estão sendo criados. Modelar o mercado de trabalho com essa restrição realista revela as lacunas de habilidades que podem se transformar em barreira para a transição de baixo carbono e onde (em quais setores) o desemprego tem maior probabilidade de surgir. O estudo constata que, no Brasil, o número de ocupações em que as pessoas podem enfrentar um risco maior de desemprego devido às dificuldades de mudança para novas ocupações é maior em um cenário em que o crescimento econômico é impulsionado principalmente pelo aumento da produtividade agrícola do que em um cenário em que o crescimento é impulsionado principalmente pela produtividade da indústria. Esses resultados podem ser utilizados para a formulação de políticas de reciclagem de trabalhadores e promoção do desenvolvimento econômico.

Figura 8: Resultados macroeconômicos em um cenário de descarbonização de longo prazo, em relação ao cenário de referência.



Introdução

A chamada para a mudança

Este relatório representa um grande esforço para fornecer evidências de diversos novos modelos econômicos aplicados a tópicos específicos relacionados à energia e a questões de política climática, a partir da parceria com *stakeholders* de áreas políticas em países-chave no cenário da transição energética global. Muitos pesquisadores, formuladores de políticas e profissionais defendem uma nova modelagem econômica da transição energética há algum tempo. Essa defesa se concentra em três áreas principais:

- 1. Novas abordagens para a avaliação de políticas climáticas são necessárias.²
- 2. É preciso modelar melhor a dinâmica tecnológica e de inovação.^{3 4}

3. É preciso modelar melhor a dinâmica subjacente à transição energética em escala nacional e global.⁵

Esses apelos para novas análises são sustentados por uma série de preocupações sobre as estruturas analíticas e de tomada de decisão atuais, envolvendo desde questões modelísticas puramente técnicas e questões específicas sobre a transição energética e como modelá-las adequadamente, a argumentos mais amplos sobre como conduzir a avaliação de políticas e decisões tomadas – preocupações essas que muitas vezes se sobrepõem e se entrelaçam. Tentamos resumí-las na Tabela 1. É importante enfatizar que diferentes tipos de modelos e abordagens analíticas endereçam diferentes subconjuntos dessas preocupações e que nenhuma abordagem sozinha atende a todas elas.

Tabela 1: Por que precisamos de uma nova modelagem econômica da transição energética?

Teoria: Questões envolvendo o escopo da transição de energia	Modelagem: Questões envolvendo os conceitos e as técnicas de modelagem	Política: Questões envolvendo a avaliação de políticas e a tomada de decisão
• A análise econômica marginal não é apropriada para lidar com a mudança estrutural transformacional exigida pelas demandas da mudança climática. • As teorias, os modelos e as estruturas de tomada de decisão existentes se baseiam no pressuposto do equilíbrio ou na visão de uma economia auto-otimizável e eficiente e, por isso, têm um viés intrínseco de que a ação política terá custos. • A teoria e os modelos baseados no equilíbrio muitas vezes não são capazes de modelar a transformação estrutural nem a inovação; então assumem que a estrutura econômica é estática e, equivocadamente, assumem que apenas grandes mudanças no nível de preços podem impedir as emissões. • O papel do setor privado na transição não é totalmente conhecido, e isso costuma ser interpretado como uma lacuna nas finanças públicas. • Deve-se representar instituições reais.	• Os modelos devem ser estruturalmente realistas (ou seja, representar os fluxos e as relações entre os atores econômicos da forma mais realista possível). • Os modelos devem capturar o desequilíbrio⁶ e a dinâmica de <i>path-dependence</i>. • Os modelos devem capturar loops de <i>feedback</i> e pontos de inflexão. • Os modelos devem capturar a heterogeneidade e a interação. • Os modelos devem capturar a incerteza e as distribuições de probabilidade de “cauda longa”. • A tomada de decisão econômica deve ser modelada usando comportamento individual realista (racionalidade limitada ou heurística). • Os modelos devem ser validados empiricamente para serem confiáveis. • Muitos modelos existentes usam trajetórias tecnológicas pouco validadas ou arbitrárias. • A dinâmica tecnológica deve ser modelada endogenamente. • Os impactos distributivos muitas vezes precisam ser modelados.	• As decisões não devem ser tomadas só em termos de custo-benefício do “melhor palpite”, para incorporar incerteza, riscos e oportunidades. • Uma gama mais ampla de opções de políticas precisa ser considerada – em vez de modelar apenas o preço do carbono, precisamos modelar uma família mais ampla de instrumentos de política com maior probabilidade de serem politicamente viáveis no mundo real. Isso pode envolver a implementação de várias políticas complementares ao mesmo tempo. • As políticas devem ser avaliadas com base em seu efeito provável sobre os processos de mudança dentro da economia (como elas afetam a dinâmica da inovação e mudança estrutural⁷), não apenas com base nos resultados previstos em pontos fixos no tempo. • Para fundamentar as decisões políticas, precisamos de modelos de previsão (forecast) mais probabilísticos (ou seja, que simulem e prevejam futuros prováveis^{8 9} em oposição a modelos de otimização que identificam soluções ou caminhos “ótimos”).

Em nossos relatórios anteriores do Projeto EEIST, enfatizamos as principais mensagens sobre a questão de como modelar a transição energética. No primeiro deles, *A Nova Economia da Inovação e Transição: Avaliando Riscos e Oportunidades*,¹⁰ descrevemos as razões em defesa de uma nova abordagem, argumentando que os maiores sucessos alcançados até agora na transição de baixo carbono aconteceram de maneiras poucas

esperadas, usando abordagens políticas que não eram as recomendadas pela análise econômica padrão. Para que mais sucessos ocorram na modelagem da avaliação de políticas *ex-ante*, precisamos de uma nova abordagem com novas técnicas complementares à avaliação de custo-benefício tradicional, que permitam compreender os riscos e oportunidades de mudanças transformacionais.

² Mercure, J-F. et al. (2021). Risk-opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal. *Global Environmental Change* 70: 102359.
³ Way, R. et al. (2022). Empirically Grounded Technology Forecasts and the Energy Transition. *Joule*: 6(9), 2057-2082.
⁴ Peñasco, C. et al. (2021). Underestimation of the Impacts of Decarbonisation Policies on Innovation to Create Domestic Growth Opportunities. C-EENRG Working Papers, 2021-6: 1-16.
⁵ Grubb, M. et al. (2021). The New Economics of Innovation and Transition: Evaluating Opportunities and Risks, EEIST report to COP26.

⁶ Aqui estamos nos referindo ao desequilíbrio como uma propriedade de sistemas complexos, não à capacidade dos modelos de estarem ou não fora de equilíbrio.
⁷ Peñasco, C. et al. (2021). Systematic Review of The Outcomes and Trade-Offs of Ten Types of Decarbonisation Policy Instruments. *Nature Climate Change* 11.3: 257-265.
⁸ Meng, J. et al. (2021). Comparing Expert Elicitation and Model-Based Probabilistic Technology Cost Forecasts for the Energy Transition. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118.27: e1917165118.
⁹ Farmer, J.D. and Lafond, F. (2016). How Predictable is Technological Progress? *Research Policy* 45.3: 647-665. ¹⁰ <https://eeist.co.uk/eeist-reports/>
¹⁰ <https://eeist.co.uk/eeist-reports/>

Em nosso segundo relatório, Dez Princípios para Formulação de Políticas na Transição Energética,¹¹ apresentamos novos princípios baseados em evidências para a formulação de políticas na transição energética, argumentando que muitos dos princípios, modelos e ferramentas de tomada de decisão usados pelos governos são projetados para uso em contextos de mudança “marginal” ou incremental, onde tecnologias, mercados e outras estruturas econômicas são relativamente estáveis. Diferentes princípios e ferramentas são necessários quando, como na transição energética, os objetivos e o contexto da política incluem inovação generalizada e mudança estrutural.

No texto principal deste relatório, para maior clareza e brevidade, nos concentramos em demonstrar o valor que esses novos princípios e abordagens de modelagem podem trazer na prática e não revisamos em profundidade os argumentos sobre se as novas abordagens são necessárias ou não. Outros já fizeram isso – por exemplo, Farmer et al (2015)¹² apresentam a taxonomia existente dos modelos de avaliação integrada e seus componentes econômicos. Eles discutem em detalhes quatro deficiências principais: (i) como esses modelos lidam com a incerteza; (ii) como representam a agregação, a heterogeneidade e os impactos distributivos; (iii) como lidam com a mudança tecnológica; e (iv) a ausência de funções de dano realistas para os impactos das mudanças climáticas na economia. Mercure et al (2016)¹³ identificam cinco deficiências nos modelos econômicos de otimização e equilíbrio existentes: (i) sua natureza normativa baseada na otimização; (ii) sua confiança irrealista na racionalidade total dos agentes; (iii) sua incapacidade de levar em conta influências mútuas entre agentes e capturar processos interrelacionados de autorreforço; (iv) sua incapacidade de representar múltiplas soluções e a dinâmica de path-dependence; e (v) sua incapacidade de explicar adequadamente a heterogeneidade do agente. Além disso, Mercure

et al (2021),¹⁴ apresentando trabalhos do Projeto EEIST, apresentam uma forma expandida de análise de custo-benefício denominada “análise de risco-oportunidade”, projetada para avaliar opções de políticas cujo objetivo ou contexto é a mudança transformacional – como é o caso da política de transições de baixo carbono. Eles também apontam que uma nova modelagem econômica é necessária para esse tipo de análise e suporte à decisão.

O IPCC também tocou nessas questões,¹⁵ cobrindo o espectro que vai desde análises de custo-benefício à base de modelos de avaliação integrados, incluindo a ênfase crescente no uso de modelos que conseguem capturar a eficiência dinâmica e não estática (ou seja, “levando em conta a inércia, o aprendizado e várias fontes adicionais de path-dependence¹⁶) até o uso de abordagens de complexidade e sistêmicas como as deste relatório. Outros autores tentaram dar uma visão geral sobre e classificar o grande ecossistema de modelos de economia climática e modelos de avaliação integrada,¹⁷ incluindo a defesa de mudanças de abordagem, com esforços para aumentar a compreensão e a participação dos envolvidos.¹⁸

Cumprindo a promessa de uma nova modelagem econômica

Apelar para a mudança é muito mais fácil do que realmente desenvolver e aplicar a nova modelagem e entregar os resultados previstos (ou seja, aconselhamento político mais realista, útil e refinado). Este relatório representa um grande esforço para demonstrar e evidenciar o valor de uma série de novos modelos econômicos sobre tópicos específicos e questões políticas, por meio de parcerias com stakeholders políticos em países-chave na transição energética global.

Este relatório contém 15 estudos de caso de aplicações de novas abordagens de modelagem econômica no Brasil, China, Índia, Reino Unido e globalmente. Cada estudo de caso descreve

um projeto recente ou atual no qual uma nova modelagem econômica foi aplicada a questões de política reais envolvendo *stakeholders*. A abordagem de estudo de caso nos permite demonstrar e refletir sobre a variedade de métodos de modelagem, propósitos e contextos. Cada estudo explica um novo modelo, mas também explica seus resultados e sua relevância do ponto de vista político. Todos ponderam se e por que as novas modelagens conseguiram produzir novos conhecimentos sobre as questões existentes ou, ainda, sobre questões que não haviam ainda sido abordadas anteriormente.

Este relatório, portanto, complementa os outros relatórios do Projeto EEIST, ajudando a detalhar a nova modelagem econômica e as discussões de política pelas quais muitos ansiavam.

A quem se destina este relatório – e como lê-lo

Este relatório é mais técnico do que os dois anteriores. Destina-se principalmente a analistas e técnicos em modelagem que trabalham no governo, em organizações internacionais, na academia e no terceiro setor, visando lhes permitir ver em primeira mão e em detalhes como as novas abordagens econômicas podem agregar valor, o que conseguem fazer e o que não conseguem. Também esperamos que os envolvidos com políticas achem o relatório útil, que o documento lhes forneça *insights* sobre tópicos relevantes em matéria de política, além de responder à questão de por que diferentes abordagens de modelagem fornecem determinadas respostas e orientações.

Juntamente com os estudos de caso, propomos uma reflexão sobre os tipos de modelos que se mostram mais promissores, considerando como eles diferem entre si, seus pontos fortes e fracos, e como podemos avaliá-los, escolher entre eles e adotá-los em nosso trabalho.

- **Para os leitores interessados nos detalhes do que esses modelos podem fazer**, recomendamos a leitura dos estudos de caso mais relevantes primeiro (seja por país ou pelos tópicos de política que abordam). Em seguida, pode ser útil ler o panorama geral dos diferentes tipos de modelos.

- **Para os leitores que cogitam usar qualquer uma das abordagens de modelagem** apresentadas aqui, recomendamos a leitura de nossa seção prática sobre como começar a usar esses métodos.

Este relatório não vai instruir os leitores sobre os detalhes técnicos de como usar esses modelos diretamente; não é um manual nesse sentido. No entanto, uma parte essencial de nossa missão é desenvolver as competências e a capacidade de organizações em todo o mundo para usar essas abordagens de modelagem, demonstrar seu valor e defender a filosofia subjacente a uma nova modelagem econômica e formulação de políticas. Se você estiver interessado em treinamento ou orientação mais detalhada, acesse <https://eeist.co.uk/training/> ou entre em contato.¹⁹

O que há no restante deste relatório?

A próxima seção enfoca os tipos de questões políticas e onde a nova modelagem econômica pode se encaixar. A seguir, explicamos o que queremos dizer exatamente com “novos modelos econômicos” e apresentamos os tipos de modelos. Em seguida, passamos para uma exploração prática de como escolher e começar a usar novas abordagens de modelagem econômica. Essa seção descreve para o quê os tipos diferentes de modelos são apropriados, mas também como adotá-los, como superar as restrições técnicas e institucionais e como defender uma nova modelagem econômica. Na seção seguinte, passamos para os próprios estudos de caso, que foram agrupados conforme os temas políticos mais amplos sobre os quais falam – a transição energética global, setores de energia e indústria, transporte, agricultura, impactos da transição, planos nacionais de descarbonização, finanças. Cada estudo apresenta o tipo de modelagem realizada, mas também o contexto político, a relevância dos resultados e sua contribuição em relação ao trabalho anterior. Por fim, concluímos com uma discussão sobre o que aprendemos com os estudos de caso como um todo e apresentamos nossa visão para os próximos cinco anos acerca de uma nova modelagem econômica para a transição energética.

¹¹ <https://eeist.co.uk/eeist-reports/>

¹² Farmer, J.D. et al. (2015). A Third Wave in the Economics of Climate Change. *Environ Resource Econ* 62: 329–357.

¹³ Mercure, J-F. et al. (2016). Modelling Complex Systems of Heterogeneous Agents to Better Design Sustainability Transitions Policy. *Global Environmental Change* 37: 102–115.

¹⁴ Mercure, J-F. et al. (2021) Risk-opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal, *Global Environmental Change* 70: 102359.

¹⁵ Grubb, M. et al. (2022): Introduction and Framing. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla. Et al (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.003 16 Ibid. page 33

¹⁷ Nikas, A. et al. (2019). A Detailed Overview and Consistent Classification of Climate-Economy Models. In: Doukas, H. et al. (eds) *Understanding Risks and Uncertainties in Energy and Climate Policy*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03152-7_1.

¹⁸ Doukas, H. and Alexandros N. (2020). Decision Support Models In Climate Policy. *European Journal of Operational Research* 280.1: 1–24

¹⁹ <https://eeist.co.uk/contact/>

Abordando as principais questões de política energética e climática

Antes de mergulharmos nos detalhes do que são as novas abordagens de modelagem econômica e suas aplicações, é importante colocar as questões políticas às quais elas se dirigem. Idealmente, as questões políticas deveriam ser o motor da nova modelagem econômica, uma vez que permitem aos pesquisadores identificar um tópico e um objetivo, o que, por sua vez, ajuda a identificar a abordagem metodológica adequada (mais sobre isso a seguir), ou a combinação de abordagens, que pode fornecer informações sobre as questões de política endereçadas, levando à tomada de decisão e geração de impactos. Se os modelos forem construídos ou aplicados sem questões de política como ponto de partida, corre-se sério risco de se investir muito tempo e esforço sem produzir uma ferramenta ou análise útil para a tomada de decisões.

Tipos de questões sobre política

A análise útil raramente é ampla. Em vez disso, tende a ser específica, com foco restrito em um dos ou todos os aspectos a seguir: contexto, setor, tecnologia, geografia e decisão política. O foco da decisão política pode variar em escala, desde questões do tipo macro como, “a descarbonização da economia nos custará dinheiro?”, até questões de nível intermediário, como “em quais tecnologias devemos nos concentrar?” ou “que tipos de

instrumentos de política podem funcionar melhor?”. E, finalmente, para questões de nível micro como “de que maneira devemos projetar este instrumento político específico?”. A Tabela 2 lista esses tipos de questões políticas, os exemplos relevantes contidos neste relatório e os tipos de modelagem que são adequados para cada uma delas.²⁰ Ressalte-se que a tabela não é exaustiva e existem outros tipos de questões, como microperguntas sobre projetos individuais, mas que não são o foco deste relatório.



Tabela 2: Tipos de questões de política e novas aplicações de modelagem econômica

Natureza da decisão (ou seja, hierarquia política)	Escopo	Exemplos de questões de política	Exemplos de estudos de caso	Abordagens adequadas ²¹
Direção e ritmo do desenvolvimento	Em toda a economia	- Devemos descarbonizar ou não? - Quanto pode custar a descarbonização? - Quais são os impactos macroeconômicos? - Quais são os efeitos fiscais e de emprego da eliminação gradual dos combustíveis fósseis e como eles devem ser gerenciados? - Quão rápido devemos fazer a transição no transporte rodoviário?	- Projeção de Custos das Tecnologias de Energia com Base em Evidências Empíricas - Descarbonizando a Economia Indiana: Políticas e Impactos - Consequências Socioeconômicas da Eliminação do Carvão na China - Complexidade Verde e Competitividade - Energias Renováveis Imparáveis e Preços Marginais na China, Índia e Brasil - Impactos Econômicos da Economia de Emissão Zero na Índia em 2070	- Modelos do tipo previsão, que não assumem que a economia é auto-otimizada e podem avaliar prováveis resultados futuros em dimensões como PIB, empregos, investimento e comércio. - Abordagens analíticas que consideram o potencial de um país ser competitivo em novas tecnologias emergentes.
Escolha de tecnologia	Dentro de cada setor	- No setor de energia, devemos usar energia solar ou a carvão? - No transporte rodoviário, devemos empregar veículos elétricos, biocombustíveis, veículos movidos a hidrogênio ou híbridos?	- Energias renováveis imparáveis e preços marginais na China, Índia e Brasil - Projeção de Custos das Tecnologias de Energia com Base em Evidências Empíricas - Complexidade Verde e Competitividade	- Modelos do tipo previsão, que podem simular o desenvolvimento de tecnologias ao longo do tempo e avaliar a viabilidade e os prováveis impactos das escolhas tecnológicas. - Avaliações quantitativas das taxas de aprendizado das tecnologias e sua compatibilidade com a meta de emissões líquidas zero. - Avaliações qualitativas e quantitativas das vantagens e desvantagens de diferentes tecnologias. - Modelos de otimização que podem encontrar mixes de tecnologia de menor custo em momentos fixos no tempo.

²⁰ Nesta fase, os tipos de modelagem são definidos em termos gerais. Tipos mais específicos são enumerados nas seções posteriores.

²¹ Veja a seção ‘O que são novos modelos econômicos?’ para uma introdução a esses tipos de modelos.

Natureza da decisão (ou seja, hierarquia política)	Escopo	Exemplos de questões de política	Exemplos de estudos de caso	Abordagens adequadas ²¹
Escolha do instrumento de política	Para cada tecnologia/objetivo	- Para empregar a energia solar, devemos usar taxaço, subsídios, cotas tecnológicas, regulação da eficiência, compras governamentais ou outra coisa? - Para empregar veículos elétricos, devemos usar regulações de eficiência, cotas tecnológicas, incentivos de compra, taxaço ou alguma combinação dos itens acima?	- Descarbonizando A Economia Indiana: Políticas e Impactos - Ativando Pontos de Inflexão de Veículos Elétricos na China, Índia, Europa e EUA	- Modelos do tipo previsão que permitem a representação detalhada de diferentes tipos de políticas e podem simular os efeitos das políticas usadas individualmente e em conjunto, com base em evidências empíricas. - Análise de oportunidade-risco²² (como uma forma expandida de análise de custo-benefício).
Desenho da política	Para cada política	- Um subsídio para tecnologia limpa deveria ser uma tarifa de tipo feed-in ou um contrato por diferença? - O preço do carbono deve ser uma taxaço ou um esquema do tipo cap-and-trade? - Como o desenho dos mercados de eletricidade afeta os resultados?	- Qual é a forma mais eficaz de precificação do carbono? - Energias renováveis imparáveis e preços marginais na China, Índia e Brasil	- Modelos do tipo previsão que permitem a representação detalhada de diferentes desenhos de políticas e simulam seus efeitos. - Modelos qualitativos que permitem incorporar suposições sobre o desenho de políticas.

Onde estamos no ciclo político?

Outra maneira de pensar sobre quais são os tipos de questões políticas e onde as abordagens de modelagem agregam valor é considerar o ciclo da política (Figura 9). Sabemos que esse ciclo é uma representação idealizada do mundo da formulação de políticas, mas serve a um propósito útil: dividir o processo em diferentes estágios, cada um implicando diferentes tipos de análise. O que esse modelo não capta bem é a natureza interativa da análise que deve apoiar a política, já que muitas vezes há um processo contínuo de ajuste e melhoria com base na utilidade, em prioridades da agenda e em dados empíricos. Na realidade, as etapas do ciclo também não são necessariamente sequenciais – pode haver setas ligando a implementação da política à definição da agenda, por exemplo. Por fim, o ciclo político também obscurece a importância da história e dos cenários políticos, onde algumas políticas podem desencadear outras ou aprisionar os países em determinados caminhos políticos.

No entanto, o ciclo nos ajuda a pensar sobre quais tipos de análise podem ser usados em cada estágio. No estágio de definição da agenda, os métodos de otimização (que não classificamos como nova modelagem econômica) têm um papel a desempenhar. Usar esses métodos para explorar qual é o ponto final ou objetivo ideal em termos de custos pode ser útil, sob um conjunto de restrições e suposições tecnológicas, para definir os contornos do que pensamos ser possível. No entanto, à medida que avançamos no ciclo, para a formulação de políticas e a tomada de decisões, vêm à tona novas abordagens de simulação econômica, que fornecem previsões de futuros realistas ou prováveis que podem resultar de ações de políticas. Esses tipos de modelos permitem fazer uma avaliação *ex-ante* significativa da eficácia e dos impactos das políticas. É importante ressaltar que eles também nos permitem entender o caminho provável para nossos objetivos, não apenas qual deveria ou poderia ser o objetivo. Isso simplesmente não é possível com modelos de otimização – não é para isso que eles foram projetados²⁴.

À medida que avançamos no ciclo para a implementação e a avaliação de *ex-post*, começamos a operar em um modo *ex-post*, avaliando o impacto real que uma política deve ter. Aqui, os métodos econométricos e estatísticos se tornam mais proeminentes, fornecendo as técnicas de análise de dados de que precisamos para avaliar os impactos dos dados reais. Métodos econométricos e estatísticos podem vir de novas abordagens econômicas ou abordagens estabelecidas. Um

desafio fundamental na avaliação *ex-post* é construir um contrafactual do que poderia ter acontecido sem uma política. Na maioria dos casos, uma abordagem experimental com um grupo de controle para fornecer um contrafactual não é viável ou ético para intervenções de política energética. Nesses casos, uma opção é usar novos modelos do tipo previsão econômica para fornecer contrafactuais, da mesma forma que avaliam um cenário de política no modo *ex-ante*.

Figure 9: O ciclo da política (adaptado de Mercure, 2022²³).



Quão claras são as questões políticas?

Assim como o processo político não é tão simples quanto sugere o ciclo político, na prática as questões políticas nem sempre são expressas com clareza ou certeza. Além disso, diferentes grupos ou equipes de formuladores de políticas podem ter perguntas diferentes, e as perguntas podem ser contestadas.²⁵ Os formuladores de políticas provavelmente também têm uma longa lista de questões, e nem sempre está claro quais são as mais importantes ou quais podem ser mais adequadas para que métodos de análise. Nessa situação, é útil interagir rapidamente com as equipes lidando com as políticas e os analistas explorando que tipo de questões devem ser o foco e como modelá-las.

O mapeamento de sistemas²⁶ é útil nessa situação. Ele nos permite descrever rapidamente o contexto político e os instrumentos de política, expor os pressupostos para discussão, começar a explorar as questões qualitativamente e fazer tudo isso com outros formuladores de políticas e grupos. Embora isso seja útil por si só, também é preferível fazer esse exercício a embarcar em um esforço significativo de modelagem quantitativa apenas para perceber no meio do caminho que as questões políticas não ficaram claras o suficiente ou que os técnicos em modelagem esqueceram de incluir os principais stakeholders na análise. Quando há falta de clareza nas questões de política, geralmente se recomenda um exercício de mapeamento de sistemas como uma etapa de preparo para uma análise mais formal.

²¹ Veja a seção 'O que são novos modelos econômicos?' para uma introdução a esses tipos de modelos.

²² Mercure, J-F. et al. (2021). Risk-Opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal. Global Environmental Change 70: 102359.

²³ Mercure, J-F. (2022). Complexity Economics for Environmental Governance. Cambridge Studies on Environment, Energy and Natural Resources Governance.

²⁴ Este ponto é discutido em nosso relatório anterior Dez Princípios para Formulação de Políticas na Transição Energética, páginas 13 e 37. <https://eeist.co.uk/eeist-reports/>

²⁵ Royston, S. et al. (2023). Masters of the Machinery: The politics of economic modelling within European energy policy. Energy Policy 173, 113386

²⁶ Barbrook-Johnson, P. and Penn. A (2022). Systems Mapping: How to Build and Use Causal Models of Systems. Palgrave.

O que são os “novos modelos econômicos”?

O que é “novo”?

A expressão “novos modelos econômicos” poderia simplesmente significar aqueles que foram desenvolvidos recentemente, mas aqui o “novo” se refere a modelos diretamente baseados na teoria e em métodos de economia da complexidade e no pensamento sistêmico. Essas disciplinas acadêmicas não são novas, mas sua aplicação a um conjunto cada vez mais amplo de tópicos econômicos, bem como o uso de dados refinados (ou seja, no nível da empresa, consumidores diferentes, tecnologias mais granulares, escalas temporais mais frequentes) estão apenas começando. Juntos, eles nos fornecem as estruturas conceituais e abordagens metodológicas para endereçar as questões identificadas na Tabela 1. Permitem desenvolver: modelos que capturam desequilíbrio,²⁷ dinâmicas de *path-dependence*,²⁸ mudanças autorreforçadas e ciclos de *feedback*,²⁹ e pontos de inflexão;³⁰ modelos que enfatizam a diferença e a interação entre os agentes econômicos; e modelos que permitem racionalidade limitada e regras práticas de tomada de decisão.³¹ Eles podem ser vistos como extensões e complementos de métodos existentes que são muitas vezes dominados por pressupostos de mercados em equilíbrio, agentes representativos e homogêneos, conhecimento perfeito, racionalidade e características ótimas de tomada de decisão.

Diferentes tipos de modelos

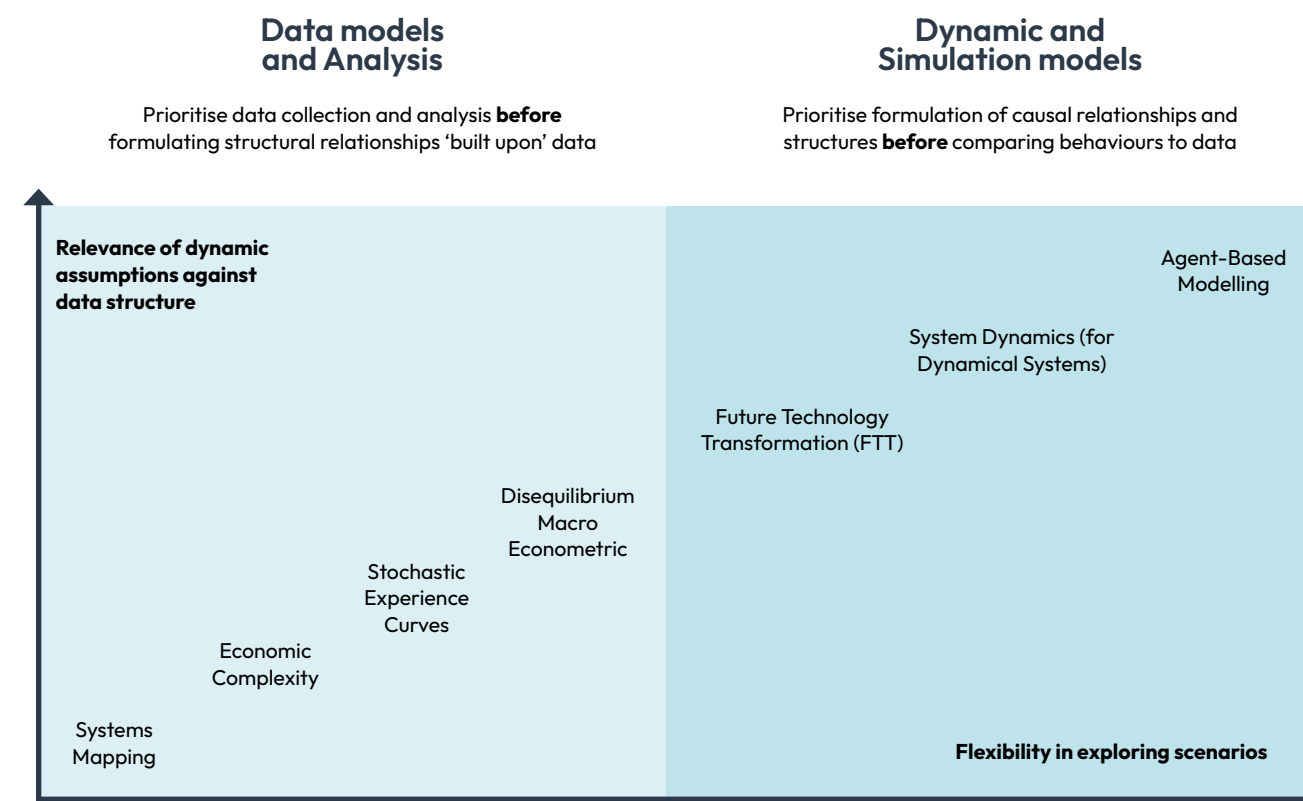
Este relatório baseia-se em uma variedade de modelos diferentes que podem ser de difícil categorização. Uma distinção importante é entre

“dados” e “modelos”. Simplificando, “dados” são medidas de indicadores do mundo real, que fornecem contexto para o caso específico em estudo e uma âncora para a descrição dos fenômenos do mundo real. “Modelos” representam uma explicação do comportamento dos dados a partir de uma perspectiva conceitual – uma exploração do possível desempenho futuro desses dados – e muitas vezes são baseados em suposições que são peculiares a uma metodologia específica. A combinação de modelos e dados pode fornecer uma análise caso a caso e, mais importante, permitir que os modelos desafiem o desempenho passado dos sistemas e proponham previsões sobre comportamentos futuros em determinadas condições.

Podemos diferenciar novos modelos econômicos entre aqueles que são baseados diretamente em dados (por exemplo, aplicam métodos analíticos e estatísticos em dados existentes para fazer extrapolações para o futuro) e aqueles que visam imitar o funcionamento do mundo real por meio de simulações dinâmicas (por exemplo, com relações estruturais supostamente representando o funcionamento de fenômenos reais), baseados em dados e validados empiricamente.

Na maioria dos casos, os modelos tendem a ser híbridos, combinando elementos de análise de dados e modelagem de simulação. No entanto, para fins de elaboração de uma lista de novos métodos econômicos, podemos dividi-los em duas categorias de acordo com sua preferência pela formulação de estruturas modelísticas e o uso de dados – consulte a Figura 10 e a Tabela 3 para uma visão geral.

Figura 10: Categorias mais amplas de novos modelos econômicos: à medida que avançamos da esquerda para a direita, passamos de abordagens baseadas na busca de estruturas ou padrões em dados para abordagens baseadas na construção de estruturas em simulações e no teste delas em relação a dados. O eixo vertical enfatiza a importância dos pressupostos e da teoria utilizada nas abordagens, que também aumenta à medida que avançamos da esquerda para a direita.



Essas duas categorias são:

- Modelos que priorizam a análise e a compreensão dos dados antes da tentativa de desenvolver estruturas de modelos para explicar esses dados.** Aqui, incluímos “modelos de dados” muitas vezes limitados por suposições estáticas (isto é, suposições que não mudam, ou que são baseadas em instantâneos no tempo) – distribuídos no lado esquerdo da Figura 9 – e os modelos “macroeconômicos de desequilíbrio” que, apesar de priorizarem a análise de dados para construir relacionamentos formais, também podem integrar novas suposições dinâmicas de sistemas do mundo real ligadas à não linearidade do desempenho futuro dos sistemas.
- Modelos que priorizam a formulação de estruturas modelísticas para explicar eventos e dados passados.** Podemos nos referir a eles de forma mais geral como “modelos dinâmicos e de simulação”, compreendendo as famílias de modelagem de sistemas dinâmicos, modelos de dinâmica de sistemas e modelos baseados em agentes. A lógica desses modelos implica que a consciência dos padrões de dados do passado pode ajudar na identificação de estruturas causais (de variáveis muitas vezes difíceis de quantificar, por exemplo, comportamentos sociais) que também podem ser informadas diretamente pelos dados (ou seja, parametrização) e comparadas a séries temporais existentes por meio de simulações (ou seja, validação). Vale a pena notar que todos os modelos e métodos que são construídos para ter impacto nas políticas do mundo real fazem uso de dados existentes.

²⁷ Em um contexto econômico, é mais simples pensar nisso como modelos não caracterizados pelo retorno aos estados de equilíbrio ou usando suposições de compensação de mercado.

²⁸ A dinâmica de *path-dependence* é geralmente encapsulada pela declaração de “assuntos históricos”. Ou seja, onde um sistema esteve e onde está agora restringem as direções e possibilidades futuras.

²⁹ Loops de *feedback*, onde um aumento (ou diminuição) em um fator aumenta (diminui) outro, que por sua vez aumenta (diminui) o fator original, cria reforço ou mudança “descontrolada”.

³⁰ Devido à proximidade de um ponto de inflexão, pequenas mudanças em um sistema ou modelo podem produzir resultados grandes ou qualitativamente diferentes.

³¹ Qualquer modelo individual pode não tentar incluir explicitamente todos esses aspectos. Isso pode tornar um modelo incontrolável ou difícil de entender, embora esses trade-offs estejam se tornando menos pronunciados com os avanços nos métodos.

A Tabela 3 descreve melhor essas classes de abordagens, especificando métodos de modelagem individuais e suas vantagens e desvantagens.

Tabela 3: Exemplos específicos de novos modelos econômicos.³²

Tipo Modelos/análise de dados

Nome	Descrição	Vantagens	Desvantagens	Exemplos de estudos de caso
Mapeamento de sistemas	Usa redes para representar e analisar influência causal entre fatores em um sistema. Frequentemente usado em atividades de engajamento com stakeholders.	Maneira intuitiva e acessível de representar uma gama de relacionamentos e influências em sistemas. Útil para identificar os efeitos dinâmicos das políticas, como diferenciar entre aquelas que serão autoamplificadas e aquelas que serão autolimitadas. Pode utilizar muitas fontes de evidências e dados. Menos intensivo em recursos do as simulações, mas também pode informar o desenvolvimento de modelos dinâmicos.	Embora o modelo tente capturar feedbacks e dinâmicas, o modelo em si é estático (ou seja, não explora como a estrutura pode mudar ou como a dinâmica funciona). Mapas grandes podem se tornar pesados e difíceis de entender.	Qual é a Forma Mais Econômica de Precificação de Carbono? Modelando o Mercado de Emissões e a Taxação de Carbono em Geral e na China Mapeamento de Sistemas Orientados a Dados de ODS e Interações de Transição Energética
Complexidade econômica ³³	Usa dados de comércio e a estrutura econômica revelada por eles para entender a direção em que uma economia pode desenvolver vantagem comparativa.	Ajuda a entender a posição atual e “possíveis posições adjacentes” de uma economia (ou seja, caminhos plausíveis de transição de produtos). Pode ser usado para fundamentar a estratégia industrial ou de desenvolvimento.	Sugere onde um país pode desenvolver vantagem competitiva, mas não sugere como. Com base apenas em dados de exportação, portanto, o consumo interno é perdido.	A Complexidade Verde e a Competitividade das Exportações da China
Curvas de experiência estocásticas	Usa as leis de Wright e Moore para fazer previsões de custos de tecnologia de energia com base na tendência anterior de implantação (ou tempo) e custos.	Produz previsões probabilísticas empiricamente validadas de custos de tecnologia de energia. Método bem testado em uma ampla gama de tecnologias e comparado com métodos de previsão especializados.	Atualmente implementado apenas em nível global. Não fornece <i>insights</i> sobre por que essas mudanças estão acontecendo.	Projeção de Custos das Tecnologias de Energia com Base em Evidências Empíricas usam esse método e conectam os resultados a um modelo de sistema de energia simples.
Desequilíbrio macroeconômico - E3ME ³⁴	Representa as relações entre diferentes variáveis econômicas e setores como um conjunto de equações, com base em padrões de dados históricos. Modelo econométrico.	Pode ser usado para identificar resultados macroeconômicos prováveis de transições de baixo carbono. Ao contrário dos modelos de Equilíbrio Geral Computável (<i>Computable General Equilibrium</i> - CGE) e de Equilíbrio Geral Estocástico Discreto (<i>Discrete Stochastic General Equilibrium</i> - DSGE) ³⁵ , não é limitado por suposições restritivas, como alocação ótima de recursos e pleno emprego. Bem usado e documentado.	Um modelo relativamente agregado. Não é adequado para modelar dinâmicas emergentes da interação de agentes heterogêneos individuais. Embora não seja limitado por pressupostos restritivos, não inclui uma restrição per se sobre o acesso ao financiamento, o que na realidade pode ser um constrangimento. Fortemente dependente dos dados e da qualidade dos dados. Não é capaz de simular mudanças sistemáticas repentinas.	Todos os estudos de caso E3ME-FTT.

Tipo Modelos dinâmicos e de simulação

Nome	Descrição	Vantagens	Desvantagens	Exemplos de estudos de caso
Futuras transformações tecnológicas (<i>future technology transformations</i> - FTT)	Usa equações que descrevem a curva S de absorção de tecnologia conforme a lei de Wright. Faz previsões de custos e difusão de tecnologia de energia, levando em consideração os <i>feedbacks</i> autorreforçados entre adoção e custos.	Pode ser usado para simular e prever os efeitos dinâmicos de políticas – por exemplo, na difusão de tecnologia e custos. Pode testar uma variedade de opções de políticas e mostrar quais combinações de políticas alcançam mais do que a soma de suas partes e quais alcançam menos.	Tem interações limitadas entre setores e interação limitada entre políticas do lado da demanda (no E3ME) e políticas do lado da oferta (nos modelos FTT)	Todos os estudos de caso E3ME-FTT.
Modelagem de dinâmica de sistemas (e modelagem de sistemas dinâmicos)	Abordagens de simulação que representam múltiplos componentes e dinâmicas estruturais de um sistema. Pode simular o comportamento de desequilíbrio por meio de loops de reforço e relacionamentos não lineares. Pode capturar pontos de inflexão.	Representa dinâmicas agregadas não lineares e em desequilíbrio de sistemas. Útil para distinguir entre abordagens de políticas que são auto-amplificadoras versus auto-limitantes, e para identificar compensações e sinergias entre políticas em diferentes setores, ou entre economia, sociedade e meio ambiente. Comunidade bem estabelecida com normas sobre metodologia.	Modelo agregado - não é adequado para modelar dinâmicas emergentes da interação de agentes heterogêneos. Requer que a estrutura dinâmica do sistema de interesse seja conhecida antecipadamente.	SDescarbonizando A Economia Indiana: Políticas e Impactos Preenchendo a Lacuna do Financiamento Verde no Reino Unido: Transição para Eletricidade de Baixo Carbono e Implicações Econômicas
Modelagem baseada em agente (<i>agent based model</i> - ABM)	Método de simulação que representa agentes individuais, sua interação uns com os outros e seu ambiente. Pode gerar propriedades emergentes em sistemas complexos.	Melhor representação realista, do ponto de vista estrutural, de sistemas complexos. Pode mostrar como agentes como diferentes tipos de consumidores, empresas ou investidores podem agir em resposta à política. Pode ser usado para descobrir a estrutura dinâmica de um sistema econômico quando isso não é conhecido antecipadamente (identificando os comportamentos do sistema que emergem das interações de diferentes atores e políticas econômicas). Isso pode ajudar nas escolhas quanto ao desenho de mercado.	Usa muitos dados (ou seja, requer dados refinados para configuração e dados de séries temporais para validação), às vezes pesado computacionalmente (ou seja, lento para executar). Tecnicamente difícil e demorado para desenvolver (por exemplo, difícil rastrear causas e consequências de fenômenos emergentes).	Modelando as Transições no Mercado de Trabalho: O Caso das Mudanças de Produtividade no Brasil modela os trabalhadores como agentes que se movimentam no mercado de trabalho brasileiro. ABM macroeconômico usado em Opções de Política para uma Descarbonização Rápida e Suave e o Crescimento Sustentável Qual é a Forma Mais Econômica de Precificação de Carbono? Modelando o Mercado de Emissões e a Taxação de Carbono em Geral e na China

³² A maioria dos estudos de caso neste relatório enquadra-se perfeitamente em uma das categorias desta tabela ou é um híbrido ou uma combinação de categorias. No entanto, um não se enquadra. O estudo Modelando o Desenvolvimento Setorial Combinado de Hidrogênio e Amônia na Índia apresenta um modelo de sistema de energia tradicional de “complexidade estendida”, ao qual não damos sua própria categoria aqui.

³³ “Complexidade econômica” aqui se refere ao domínio específico de literatura sobre o uso de dados de comércio para entender a sofisticação de diferentes economias nacionais. É um termo inútil porque é muito genérico e muitas vezes confundido com “economia da complexidade”, mas é o termo reconhecido para este trabalho, por isso o usamos.

³⁴ Tecnicamente, E3ME e FTT são modelos específicos, não classes de modelos. No entanto, devido à sua posição central no projeto EEIST e à nova modelagem econômica de forma mais ampla, damos a ela sua própria categoria aqui.

³⁵ Modelos de Equilíbrio Geral Computável e Equilíbrio Geral Estocástico Dinâmico. Não apresentamos aqui essas abordagens bem conhecidas. Para uma introdução, consulte Burfisher, M. E. (2011). Introduction to Computable General Equilibrium Models. Cambridge University Press and Wickens, M. (2012). Macroeconomic Theory: A Dynamic General Equilibrium Approach. Princeton University Press.

Como escolher e usar novos modelos econômicos

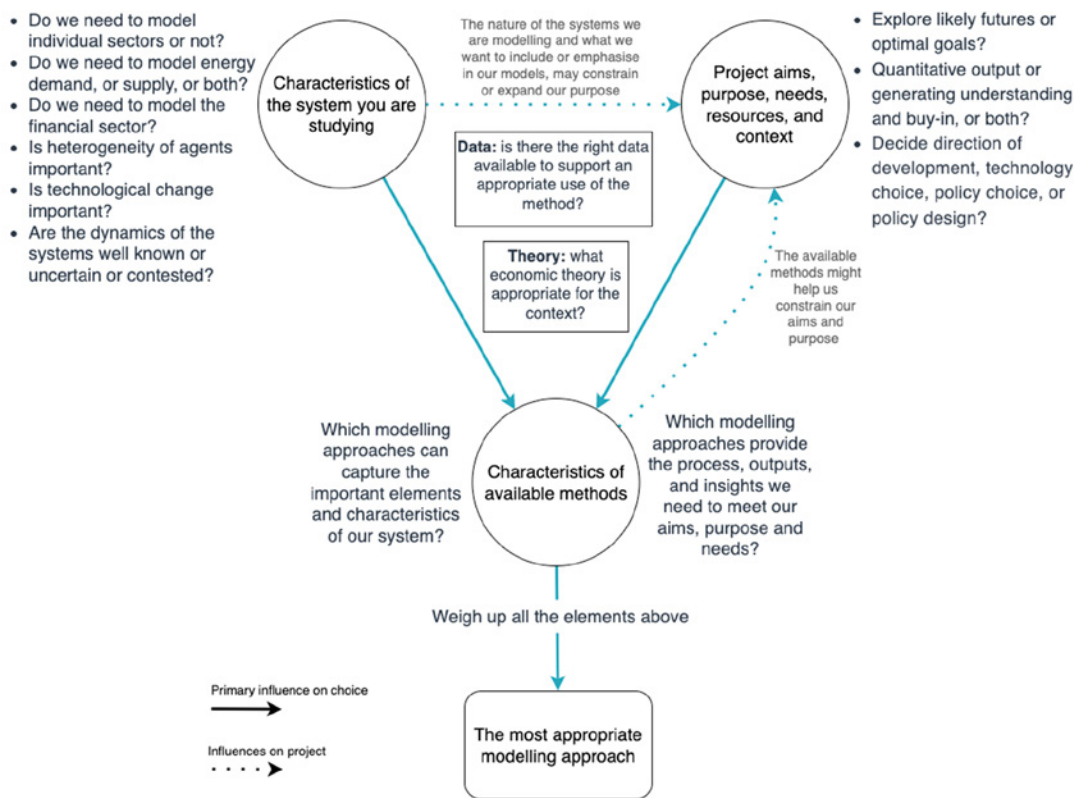
Agora que temos uma noção do que são os novos modelos econômicos e dos tipos de questões políticas que podem ser endereçadas, nesta seção vamos descrever como escolher os métodos e começar a usá-los na prática. Essas escolhas precisam ser feitas com todos os métodos, novos ou não; porém, como as abordagens descritas neste relatório são menos estabelecidas do que outras, vale a pena considerar essas questões em detalhes.

Escolhendo a abordagem de modelagem mais apropriada

Raramente há uma escolha simples do tipo “melhor para o pior” ao selecionar a abordagem de modelagem a ser utilizada. Haverá métodos que são inapropriados para questões e propósitos específicos e entre as escolhas apropriadas há prós e contras que diferem conforme o contexto. O negócio é encontrar a abordagem mais “apropriada” tendo em conta o

propósito, objetivos, recursos, dados disponíveis e contexto – e dadas as características dos sistemas econômicos e energéticos que serão representados. Mesmo levando tudo isso em consideração, pode não haver uma escolha óbvia. Sempre que o tempo e os recursos permitirem, pode ser benéfico combinar vários métodos. Isso tem o benefício adicional de fornecer uma indicação da robustez dos resultados – ou seja, será que eles são os mesmos em diferentes métodos?

A Figura 11 descreve como o objetivo do projeto, as características do sistema e as abordagens de modelagem interagem na determinação do modelo mais adequado.



Propósito e objetivos do projeto (resumidos na Tabela 4): Estes podem ser muito diferentes de um projeto para outro, e o propósito também pode evoluir ao longo do tempo ou ser visto de forma diferente por diferentes atores. No entanto, em sua essência, todos os projetos de modelagem da transição energética precisam ser claros em relação a uma variedade de questões relativas a seu propósito. Por exemplo:

1. Estamos tentando identificar o estado final desejável para a transição, dadas algumas restrições, ou estamos tentando identificar políticas que nos ajudarão a chegar lá?
2. O que valorizamos mais: (i) produzir um resultado quantitativo, (ii) gerar compreensão e adesão por parte dos stakeholders ou (iii) as duas coisas?
3. Estamos mais interessados em informar a direção do desenvolvimento, a escolha de tecnologia, a escolha da política ou o desenho da política?

Além do propósito imediato, há também os recursos e os contextos do projeto, as necessidades e os objetivos dos stakeholders, bem como a disponibilidade e a qualidade dos dados. Todos esses aspectos interagem com nossas intenções para o propósito do projeto, restringindo-o ou aumentando-o de diferentes maneiras.

Por exemplo, o estágio em que estamos no processo político pode afetar as escolhas. Se uma política está nos estágios iniciais de elaboração ou discussão, podemos ter um propósito mais “exploratório”, que abre mais opções

e nos permite experimentar novos métodos. Por outro lado, se o desenho da política já está definido e queremos avaliá-lo em detalhes, ou se queremos entender que impactos uma política existente pode produzir nos próximos anos, então temos um propósito mais restrito, focado em explorar futuros prováveis em detalhes. Isso significa que é muito mais provável buscar uma abordagem testada e comprovada.

Os dados são um recurso-chave. Muitas abordagens de modelagem consomem muitos dados e dependem da disponibilidade dos dados corretos. A utilidade dos modelos para diferentes propósitos geralmente aumenta ou diminui com a quantidade e a qualidade dos dados disponíveis para inicializar e validar os modelos. No entanto, alguns métodos são mais adequados para trabalhar em contextos de poucos dados. Quando há dados disponíveis, o problema do *overfitting* (ou seja, produzir um modelo ou análise que corresponde bem a um determinado conjunto de dados, mas não a outros, ou tem desempenho ruim nas previsões) afeta tanto as novas abordagens quanto os modelos tradicionais. Isso pode acontecer quando há problemas específicos nos próprios métodos, que são suscetíveis ao *overfitting*. Também pode ocorrer quando há uma compreensão insuficientemente dos fenômenos sociais subjacentes, levando a limitações nas generalizações (ou à inexistência delas) em contextos em que as relações sociais e econômicas são um pouco diferentes.

Tabela 4: Como os aspectos em torno do objetivo do projeto moldam o método de modelagem mais adequado.

Aspecto	Situação Potencial	Método/Modelo Mais Apropriado
Finalidade e objetivos	Explore os prováveis efeitos das políticas	Modelos do tipo <i>bottom-up</i> ou estruturalmente realistas, como E3ME, ABMs, modelos de sistemas de energia
	Resultados ideais	Modelos de avaliação integrados baseados em processos. ³²
	Compreensão, escolha de políticas e aceitação	Modelos mais simples ou qualitativos, como mapeamento de sistemas
	Análise detalhada da política	Modelos que podem representar diferentes políticas de maneiras precisas e significativamente diferentes, como FTT ou ABMs muito aplicados
	Comportamento amplo do sistema	Modelos mais simples, como modelos de dinâmica de sistemas, ou modelos de sistemas de energia relativamente simples
Recursos de tempo e dinheiro	Muitos recursos	Modelos maiores, como E3ME ou ABM
	Poucos recursos	Modelos relativamente mais simples, como o de dinâmica de sistemas, mapeamento de sistemas ou modelos maiores que já atendem às necessidades de perto
Dados disponíveis	Rico em dados	Modelos que usam muitos dados, como ABMs aplicados, mapeamento de sistemas orientados a dados
	Pobre em dados	Modelos qualitativos, como mapeamento de sistemas
Contexto	Início do ciclo político	Mais espaço para métodos diferentes e menos estabelecidos; valor em modelos que aumentam a compreensão do comportamento do sistema
	Final do ciclo político	Pressão para usar modelos testados e comprovados e com resultados quantitativos; maior necessidade de especificidade nas opções políticas a serem testadas
	Área política contestada	Métodos que nos permitem questionar suposições e construir adesão, como mapeamento de sistemas; valor no uso de uma variedade de modelos, para comparar resultados com diferentes suposições

³² Esses são os grupos mais detalhados de IAMS, como AIM- Enduse, GCAM, IMACLIM, IMAGE, MESSAGE-GLOBIOM e REMIND. Para uma discussão destes modelos, ver: Wilson, C. et al. (2021). Evaluating Process-based Integrated Assessment Models of Climate Change Mitigation. Climatic Change. 166.3.

Características do sistema: a transição energética afeta e é impactada por muitos sistemas econômicos, sociais, ecológicos e tecnológicos diferentes. Raramente precisamos modelar todos eles e, quando o fizermos, modelaremos alguns com mais detalhes do que outros. Também podemos modelá-los de maneiras diferentes (isto é, representando elementos diferentes de maneiras diferentes ou enfatizando algumas partes em detrimento de outras), dependendo dos objetivos e da importância das características específicas dos sistemas para nossas questões e propósitos.

Existem vários conjuntos de questões estruturais que devemos nos perguntar regularmente ao escolher quais coisas modelar na transição energética:

1. Precisamos modelar instituições, tecnologias ou setores econômicos individuais ou podemos agregá-los? Da mesma forma, a mudança tecnológica é importante? Precisamos considerar separadamente os avanços nos conhecimentos ou nas tecnologias fora do setor de energia? Queremos modelar cenários ou políticas com mudanças específicas do setor ou queremos entender os impactos específicos do setor? Se sim, inclua setores, caso contrário, podemos simplificar.
2. Com que nível de detalhe precisamos modelar a demanda e o suprimento de energia? Ou, em outras palavras, quão detalhada deve ser a modelagem do sistema de energia e da economia? É provável que se queira focar em um ou outro e não devemos ter medo de usar um modelo simples para um quando nosso foco é realmente o outro.
3. Precisamos modelar o sistema financeiro? Acreditamos que o processo de aquisição de crédito, ou investimento, é importante no comportamento do sistema? Podemos fazer modelagem útil sem incluir o sistema financeiro?

Há também um segundo conjunto de questões, sobre como modelamos os sistemas que queremos cobrir:

1. Precisamos modelar a heterogeneidade e a interação entre atores como consumidores, empresas e investidores, ou podemos agregar seu comportamento dentro de cada um desses grupos? Se sim, provavelmente devemos modelá-los; caso contrário, podemos simplificá-los.
2. Queremos modelar um (sub)sistema de forma endógena ou exógena? Dito de outra forma, queremos modelar a dinâmica interna de um (sub)sistema e como ele é afetado por outras

coisas no modelo, ou podemos simplificá-lo ou tratá-lo como estático? Por exemplo, queremos modelar a inovação tecnológica? As principais questões aqui incluem se temos bons dados e compreensão de um subsistema e quão importante é para nossas perguntas ou importante no comportamento do sistema. Podemos querer representá-lo endogenamente e capturar *feedbacks* entre ele e outras partes do nosso modelo.

3. Como queremos modelar o comportamento humano e a tomada de decisão: usando expectativas racionais, ou com racionalidade limitada ou outras regras sociais ou heurísticas de tomada de decisão? Acreditamos que um modelo de expectativas racionais de tomada de decisão é apropriado para o nosso contexto, ou ele perde sistematicamente decisões/dinâmicas importantes?
4. Quais características comportamentais dos sistemas – ou seja, *path-dependence*, comportamento emergente, complementaridades e dependências tecnológicas, pontos de inflexão ou *feedbacks* – queremos capturar? Existem conceitos específicos que acreditamos estar direcionando o comportamento no sistema e queremos entender em detalhes? Por exemplo, *path-dependence*, *feedbacks* ou pontos inflexão.
5. Como devemos capturar a incerteza? Para muitos contextos, a “incerteza da estrutura do modelo” pode ser mais importante do que a “incerteza do parâmetro”; portanto, pode ser importante escolher uma abordagem de modelagem que consiga representar e incorporar a primeira. A análise de sensibilidade torna-se então uma ferramenta chave para explorar a incerteza da estrutura do modelo.

Finalmente, muitas vezes é vital saber se a dinâmica do sistema em questão é bem conhecida, incerta ou contestada. Isso pode ter implicações para escolher os métodos mais apropriados. Onde as dinâmicas são contestadas, podemos optar por um método mais qualitativo ou participativo para ajudar a resolver questões em aberto com os *stakeholders*, enquanto onde as dinâmicas são bem acordadas, é muito mais provável usar um método de simulação quantitativa com sucesso. O objetivo do projeto desempenha um papel importante aqui e, idealmente, sempre deve estar ciente do status das percepções da dinâmica e do comportamento do sistema.

Refletindo sobre previsão, previsão e validação empírica

Em muitos contextos, técnicos em modelagem e formuladores de políticas estão interessados em usar modelos para prever como as políticas afetarão os resultados. Ter um entendimento claro sobre as expectativas de previsão e predição é vital – geralmente, os usuários podem ter expectativas diferentes sobre se os modelos conseguem ou devem ser usados de determinada maneira. Antes de discutir isso, precisamos definir conceitos e reconhecer que frequentemente os modelos são usados de maneiras diferentes. Por predição, queremos dizer uma tentativa de reduzir a aleatoriedade estreitando os possíveis estados do mundo. Assim, uma predição é uma declaração sobre a probabilidade de diferentes estados e não precisa ser sobre o futuro. Por exemplo, a Lei dos Gases Ideais nos permite prever a pressão de um recipiente de gás em um determinado ponto no tempo se conhecermos o volume nesse mesmo ponto no tempo. Já a previsão é especificamente uma predição sobre o futuro.

A validação empírica pode se referir a muitas abordagens diferentes para testar se um modelo está dando boas predições ou previsões. Para isso deve-se garantir que o desenho do modelo faz sentido, considerado alguns dados ou teoria que temos sobre os mecanismos e a estrutura do sistema. Também podemos validar testando os resultados do modelo em relação a dados reais, para entender o quão bem ele os predisse ou previu. Debate-se frequentemente a escolha entre esses dois tipos de validação.

As predições têm valor apenas na medida em que são precisas. Isso significa que a validação empírica é essencial. Até validar um modelo usando-o para fazer predições e testar sua qualidade, não sabemos se ele é útil. É essencial testar contra *benchmarks*, tais como suposições aleatórias, e é surpreendente como muitos modelos econômicos falham em superar modelos nulos simples.

Os modelos são úteis para mais do que fazer predições. Em muitos casos, podem ser usados para entender a lógica de um determinado sistema. Como cada parte do sistema afeta as outras partes? Às vezes, os modelos qualitativos são uma boa maneira de começar. Porém, à medida que a modelagem se desenvolve, muitas vezes queremos tornar nossos modelos mais quantitativos e mais confiáveis. O papel fundamental da validação empírica é que ela nos ajuda a dizer se um modelo tem algum realismo – e onde se reivindica realismo, deve-se suspeitar de análises baseadas em modelos que não fazem boas previsões.

A partir dessa perspectiva, é importante distinguir o quão bem um modelo ajusta os dados de uma amostra do quão bem ele prevê os dados fora da amostra. Por “dados de uma amostra” queremos dizer dados que estavam disponíveis quando o modelo foi construído e que foram usados para estimar seus parâmetros. Em contraste, “dados fora da amostra” se referem a novos dados que não estavam disponíveis quando o modelo foi construído. *Overfitting* é a situação em que um modelo ajusta bem os dados dentro da amostra, mas produz previsões ruins fora da amostra. Desse ponto de vista, muitas vezes um modelo mais simples é melhor, sendo menos provável que resulte superajustado porque tem menos parâmetros para ajustar.

Overfitting não é apenas sobre predição. Para avaliação de políticas, é sempre tentador assumir que modelos complicados que se ajustam bem aos dados disponíveis são mais realistas e, portanto, devem fornecer melhores respostas. No entanto, uma medida do realismo de um modelo não deve ser apenas seu desenho, mas também a qualidade de suas previsões. Com isso em mente, modelos simples costumam ser mais confiáveis, mesmo para análise de políticas.

A modelagem econômica é difícil, então fazer boas previsões exigirá muito tempo e esforço. Infelizmente, muitas vezes somos forçados a tomar decisões importantes com base em modelos inadequados. Nossa filosofia é, quando apropriado, testar modelos de forma ampla e ser claro sobre sua precisão, gerenciando as expectativas para que o usuário entenda para que serve o modelo e o quão confiável ele é.

Como começar a usar essas abordagens

Nossa intenção é que economistas, analistas e formuladores de políticas em governos nacionais, organizações multilaterais, setor privado e sociedade civil façam mais uso das abordagens de modelagem apresentadas neste relatório. Existem grandes oportunidades para desenvolver análises novas e uma demanda crescente por esse trabalho.

Existem também potenciais restrições de natureza conceitual, prática e institucional pelo caminho. Nós mesmos as encontramos, junto com nossos colaboradores, e começamos a pensar seriamente em como superá-las de maneira que não seja apenas ad hoc. Nesta seção, discutimos as barreiras que podem aparecer e como podemos superá-las, de forma a aplicar as novas modelagens econômicas extraindo delas o máximo de valor nas configurações certas.

Restrições potenciais: conceituais, práticas e institucionais

A principal **restrição conceitual** será provavelmente a percepção de que os novos modelos econômicos concorrem diretamente com as abordagens existentes. As abordagens econômicas existentes têm sido bem-sucedidas em muitos domínios e são valorizadas por sua clareza e aparente rigor quantitativo. A economia ocupa uma posição extremamente influente na formulação de políticas, mais do que outras ciências sociais. A área também possui um conjunto estabelecido de princípios e ferramentas incorporados ao treinamento e à formação, assim como muitas vozes nos ministérios da fazenda e outros departamentos governamentais, além de organizações internacionais.

O que importa é escolher a teoria econômica, os modelos e os métodos de tomada de decisão que sejam apropriados para determinado propósito e contexto. Em vez de tratar diferentes abordagens econômicas como concorrentes ou rivais, é mais produtivo vê-las como complementares, para serem usadas em diferentes contextos, dependendo do propósito e de quão apropriadas se mostrem enquanto lentes teóricas ou ferramentas analíticas para as questões de interesse.

Tabela 5: Reações comuns à nova modelagem econômica

Reação comum às novas modelagens econômicas	Como responder e propor uma discussão construtiva
A nova modelagem econômica critica um “espantinho” da economia e muitas das críticas foram abordadas em trabalhos recentes (ou seja, as críticas são feitas a uma visão desatualizada da economia convencional).	Essa é a reação mais importante para enfrentar. Em qualquer contexto que essa questão apareça, tente se aprofundar, para entender qual é o trabalho recente e se ele aborda as críticas que a nova modelagem econômica faz. Um problema comum é a confusão sobre o propósito de projetos de modelagem individuais, o que obscurece a discussão. Muitos debates podem ser dissipados deixando claro que o propósito da nova modelagem econômica é muitas vezes diferente do das abordagens existentes. Também é comum que surjam mal-entendidos em torno da terminologia ou do uso de conceitos; portanto, aprofundar e comparar abordagens cuidadosamente é um primeiro passo. Muitas vezes, também é o primeiro passo para o uso de novas abordagens.
Os pressupostos e as estruturas conceituais da economia existentes são valiosos e, portanto, não devem ser abandonados.	Não estamos defendendo o abandono do trabalho existente, mas sim a seleção de abordagens que sejam apropriadas aos contextos. Em contextos de mudanças transformacionais (isto é, de todo o sistema) ou estruturais necessárias ou em andamento, análises que se baseiam em pressupostos de marginalidade (isto é, intervenções que não afetarão capacidades tecnológicas, estruturas de mercado ou a economia em geral) não são apropriadas. Assim, quando estamos modelando a transição energética, que representa um dos principais exemplos de mudança transformacional, devemos ser extremamente cuidadosos ao usar abordagens marginais.
Novos modelos econômicos não são bem testados ou confiáveis.	A economia da complexidade e as abordagens de sistemas que apresentamos neste relatório foram bem testadas nos últimos 10 anos em uma variedade de domínios políticos. No entanto, é justo dizer que muitas das técnicas que defendemos não estão bem estabelecidas em matéria de política de energia e mudança climática. No entanto, há uma clara necessidade de políticas para fazer um progresso mais rápido nas transições de baixo carbono, as limitações das abordagens atualmente dominantes estão bem documentadas e há fortes razões teóricas para acreditar que essas novas abordagens têm vantagens significativas. A influência dessas abordagens na tomada de decisão está aumentando, assim como o número de atores trabalhando com elas em governos nacionais e organizações internacionais. Este relatório fornece exemplos dessas abordagens sendo usadas com formuladores de políticas em contextos importantes. As principais organizações que fazem uso delas incluem: a ONU, a OCDE, a UE, o Banco Mundial, o Instituto de Pesquisa Energética da China, o Instituto de Recursos Mundiais, o Banco da Inglaterra e o Departamento de Negócios e Energia do governo do Reino Unido.

No entanto, quem defende novos modelos econômicos provavelmente encontrará a resistência de alguns economistas e (de forma mais ampla) de técnicos em modelagem e, por isso, deve estar pronto para argumentar sobre os prós e contras do uso dessas abordagens e como elas se encaixam. Na Tabela 5, tentamos delinear essas e algumas das possíveis respostas construtivas.

As restrições práticas são normalmente mais importantes para a qualidade do trabalho com os novos modelos econômicos do que as restrições conceituais. A principal restrição prática geralmente vem dos dados. As abordagens de modelagem apresentadas aqui, especialmente os modelos ABM, consomem muitos dados; ou seja, requerem muitos dados ao longo do tempo, e muitas vezes dados desagregados, para poderem ser inicializados, calibrados e validados. O apêndice descreve os requisitos exatos de dados de muitos dos estudos de caso contidos neste relatório, e esperamos ser útil para se ter uma noção precisa do que significa consumir muitos dados. Mesmo quando os modelos não consomem muitos dados, eles podem exigir dados diferentes comparativamente a outros modelos, os quais podem não estar acessíveis imediatamente.

Além dos dados, os novos modelos econômicos podem não produzir os mesmos tipos de dados ou de previsão com os quais as organizações estão acostumadas (por exemplo, estimativas de indicadores ou variáveis particulares, ou gráficos). No entanto, parte da precisão dos métodos estabelecidos pode ser ilusória. Novos modelos econômicos são frequentemente estocásticos e/ou sistêmicos em sua abordagem e favorecem a exploração da incerteza; portanto, fornecerão intervalos e estimativas de resultados, não previsões pontuais. Isso, por sua vez, requer uma abordagem mais probabilística para uma análise mais aprofundada. Antes de usar um novo método, verifique quais resultados ele produz e de que forma e pense em como eles podem ser usados no fluxo de trabalho organizacional.

As restrições institucionais são uma combinação de restrições práticas e conceituais que se aplicam a organizações específicas. Algumas instituições são inerentemente avessas ao risco e podem evitar o uso de métodos percebidos como não testados ou menos eficientes e preferir métodos já usados ou bem compreendidos. As organizações podem preferir modelos “multifuncionais” com ampla aplicabilidade e de fácil manutenção a modelos especializados, onde os recursos e as habilidades para usá-los e mantê-los serão mais raros.

A culturas, o treinamento e as estruturas das organizações também podem ser construídos em torno de um método ou modelo existente, de forma a permitir seu uso (por exemplo, equipes, programas de treinamento e funções dedicadas a partes de modelos, relatórios regulares e eventos organizados em torno de cronogramas de análise). Também pode haver esforços de modelagem sendo executados em paralelo que venham a ser reunidos posteriormente (por exemplo, executando previsões econômicas em escalas de tempo de curto, médio e longo prazo). Adotar novas abordagens no lugar de outras pode torná-las incompatíveis. Trata-se de barreiras muito sérias, que nenhum método poderia superar se a nova abordagem for vista como um substituto direto. Nessas situações, trabalhar em paralelo costuma ser o único caminho a seguir, mas pode também ser um trabalho adicional desnecessário.

Como proceder?
Dadas as oportunidades claras e as restrições potenciais, como proceder com a adoção e o uso de novas abordagens de modelagem econômica? Aqui está uma lista tentativa de sugestões com base em nosso aprendizado:

1. **Comece pequeno e aumente.** Use estudos-piloto e pequenos projetos focados em questões políticas específicas para mostrar como novos modelos econômicos podem agregar valor. Isso permitirá que as organizações aprendam e cresçam gradualmente.
2. **Mapeamento de sistemas como ponto de entrada.**³⁷ Use o mapeamento de sistemas, um método intuitivo e fácil de começar para explorar tópicos e analisar a dinâmica de um problema de política. Isso pode abrir os olhos das pessoas para a complexidade de um tema e como pensar sobre ele de forma diferente. Quando bem executado, o mapeamento de sistemas pode (i) informar a política diretamente, sem a necessidade de construir um modelo quantitativo, (ii) mostrar por que os modelos de desequilíbrio podem ser úteis e (iii) ser o primeiro passo na mudança para um novo modelo econômico quantitativo.
3. **Torne-se um defensor dos modelos.** Crie uma coalizão de defensores (ou usuários) dentro e ao redor de sua organização, conectando pessoas com ideias semelhantes. Pratique e acostume-se a argumentar a favor da importância e da complementaridade dessas abordagens em termos que façam sentido para os outros, não apenas para os apoiadores existentes. Construa legitimidade e credibilidade em torno desses métodos, por meio de pilotos e parcerias com grupos externos que os utilizam. Reúna exemplos de outros lugares onde esses métodos geraram valor (este relatório, por exemplo).
4. **Construa capacidade e experiência.** As organizações que trabalham na transição precisam de pessoas que possam usar esses métodos. Pense no treinamento e na capacitação de que eles precisam para fazer isso e como as organizações podem fornecê-los ou acessá-los. Considere como ajustar os processos de contratação ou aquisição para incentivar as pessoas interessadas nesses métodos.
5. **Desenvolva orientações sob medida.** Já existe orientação genérica, mas também será útil orientação direcionada para organizações específicas. Em particular, recomendamos o desenvolvimento de orientações para a análise de políticas que distingam entre princípios e ferramentas apropriados para mudanças marginais e aqueles apropriados para mudanças não marginais (incluindo transformacionais).

³⁷ Aqui, estamos nos referindo ao método específico “mapeamento de sistemas (ver Barbrook-Johnson, P. and Penn, A. 2022. Systems Mapping. Palgrave), mas isso também pode se aplicar ao pensamento sistêmico de forma mais ampla. Para obter uma introdução para funcionários públicos, consulte <https://www.gov.uk/government/publications/systems-thinking-for-civil-servants>



Estudos de caso de novas aplicações de modelagem econômica

Esta seção apresenta a principal contribuição deste relatório: uma biblioteca de 15 estudos de caso de novos modelos econômicos aplicados a questões de política energética e climática nacionais e globais. Esses estudos podem ser lidos sozinhos ou combinados. Todos eles apresentam um tópico de política em questão, aspectos metodológicos, resultados e implicações (incluindo comparação com outras análises, quando apropriado), mas não seguem uma fórmula rígida. Também descrevem a natureza do engajamento político envolvido no trabalho.



A Tabela 6 apresenta uma visão geral dos estudos de caso contidos neste relatório. Nós os agrupamos conforme temas políticos mais amplos sobre os quais versam: a transição energética global; setores de energia e indústria, transporte, agricultura; impactos da transição; planos nacionais de descarbonização; e finanças.

Tabela 6: Visão geral dos estudos de caso.

Grupo	Nome	Região	Pergunta de política	Abordagem de modelagem	Principais resultados
A transição energética global	Projeção de Custos das Tecnologias de Energia com Base em Evidências Empíricas	Global	Quanto custará a transição energética?	Previsões probabilísticas do custo de tecnologias de energia e modelo de sistema de energia simples	É provável que a transição energética economize trilhões de dólares americanos para a economia global.
	Opções de Política para uma Descarbonização Rápida e Suave e o Crescimento Sustentável	Global	Quais pacotes de políticas climáticas são melhores para promover e sustentar a transição energética sem desestabilizar o sistema econômico e o orçamento público?	Modelo baseado em agente	A precificação do carbono por si só é ineficaz, mas misturar restrições a combustíveis fósseis, subsídios à infraestrutura pública e padrões de eletrificação mostra um bom potencial para promover a redução do crescimento das emissões e ao mesmo tempo aumentar o crescimento e manter a estabilidade macrofinanceira.
Setores de energia e indústria	Renováveis Imparáveis e Preços Marginais na China, Índia e Brasil	Brasil, China, Índia	Como as barreiras à absorção variável de energia renovável e o desenho dos mercados de eletricidade podem afetar os preços da eletricidade nos sistemas de energia do futuro?	E3ME- FTT: Geração de energia	A superação de barreiras à absorção de energia renovável variável (variable renewable energy - VRE) provavelmente levará a mais reduções de preço da eletricidade. Um mecanismo de precificação de eletricidade amplamente alinhado com o custo nivelado médio ponderado (WALC, ou seja, custos esperados ao longo da vida, em vez de custo marginal) pode ser capaz de acomodar uma maior aceitação de VRE. O ponto focal para os formuladores de políticas deve ser minimizar as barreiras e moldar um mercado adequado para sistemas de energia dominados por tecnologias VRE.
	Modelando o Desenvolvimento Setorial Combinado de Hidrogênio e Amônia na Índia	Índia	A construção de infraestrutura verde de hidrogênio e amônia na Índia pode facilitar a transição para uma rede de eletricidade líquida zero?	Modelo de sistema de energia estendido por complexidade	Existem custos para a política atual que nos colocou no caminho de dissociar os setores emergentes de hidrogênio e de amônia da rede elétrica. Existem oportunidades para construir sistemas mais resilientes e de baixo custo se o sistema for projetado com o acoplamento de setores em mente.
	Qual é a Forma Mais Econômica de Precificação de Carbono? Modelando o Mercado de Emissões e a Taxação de Carbono em Geral e na China	China	Qual é a forma mais econômica de precificação do carbono na China?	Um exercício de mapeamento de sistemas qualitativo e um modelo baseado em agente	Os mercados de emissões (emission trading schemes - ETS) precisam ser projetados para evitar a introdução de feedback de equilíbrio nas emissões. Sem isso, a taxa sobre o carbono será mais econômica. A concorrência no setor de energia (ou, mais precisamente, um sinal de preço claro) é fundamental para permitir que as políticas de precificação do carbono funcionem com mais eficiência.

Grupo	Nome	Região	Pergunta de política	Abordagem de modelagem	Principais resultados
Transporte	Ativando Pontos de Inflexão de Veículos Elétricos na China, Índia, Europa e EUA	China, Índia, Europa, EUA	Quais políticas, individualmente e em combinação, são mais eficazes na condução da transição para veículos elétricos? Como uma transição rápida se compara a uma transição lenta, em termos de custos no setor de transporte rodoviário e em termos de consequências macroeconômicas?	E3ME- FTT: Transporte	O ponto de inflexão de paridade de custo entre veículos elétricos (<i>electric vehicles</i> – EVs) e veículos com motor de combustão interna (<i>internal combustion engine vehicles</i> – ICEVs) está próximo nos principais mercados. Um subsídio a EVs que preencha a lacuna de custo entre VEs e ICEVs pode se tornar neutro em termos de receita com apenas um pequeno imposto sobre ICEVs. Regulações e cotas tecnológicas são mais econômicas do que incentivos financeiros para conduzir a transição para EVs quando usados individualmente e também podem contribuir para pacotes de políticas altamente eficazes. Uma transição rápida para EVs economiza custos em comparação com uma transição lenta. As consequências macroeconômicas da transição para EVs provavelmente serão mais positivas para os grandes países importadores de petróleo e mais negativas para os grandes países exportadores de petróleo.
Agricultura	Apoiando a Expansão da Agricultura Sustentável: uma Abordagem Usando Modelo Baseado em Agente	Global	As instituições devem apoiar a expansão sustentável da agricultura e quais fatores tornam essa intervenção mais urgente?	Modelo baseado em agente	As instituições devem promover e incentivar a agricultura sustentável e o apoio precoce é mais benéfico. Se as políticas de apoio forem introduzidas tarde demais, a lacuna tecnológica torna-se grande, criando situações de <i>lock-in</i> .
Impactos da transição energética	Modelando as Transições do Mercado de Trabalho : o Caso das Mudanças de Produtividade no Brasil	Brasil	Como o desemprego é afetado por trajetórias de crescimento com diferentes drivers e resultados de emissões no Brasil?	Modelo baseado em agente	O número de ocupações que enfrentam maior desemprego é menor nas trajetórias de crescimento de emissões mais baixas do que nas trajetórias de crescimento de altas emissões. Maior produtividade na indústria está mais alinhada com as metas do NDC do Brasil e resulta em menos atritos no mercado de trabalho.
	A China e as Consequências Sociais da Transição do Carvão	China	Quais são os efeitos fiscais e de emprego da eliminação gradual da energia a carvão na China?	Microsimulação ³⁸	Há perdas fiscais e de empregos associadas à transição do carvão; porém, dados os subsídios atuais, é provável que seja um dreno fiscal.

³⁸ Microsimulações têm muito em comum com modelos baseados em agentes, representando atores individuais, mas normalmente não modelam interações entre atores.

Grupo	Nome	Região	Pergunta de política	Abordagem de modelagem	Principais resultados
Planos nacionais de descarbonização	Impactos Econômicos da Economia de Emissão Zero na Índia em 2070	Índia	Quais são os impactos macroeconômicos de atingir o zero líquido na Índia até 2070?	E3ME-FTT: Geração de Energia	A energia solar se tornará uma tecnologia dominante em 2070. A transição para uma economia líquida zero leva a impactos macroeconômicos líquidos positivos para a Índia. Também provavelmente levará à destruição de empregos nos setores relacionados a combustíveis fósseis, com mais de 2 milhões de empregos em risco. No entanto, apoiará a criação de empregos em outros setores, como geração de energia, construção e serviços.
	Descarbonizando A Economia Indiana: Políticas e Impactos	Índia	Quais são as políticas mais impactantes para descarbonizar a economia indiana? Quais são as prováveis implicações disso no crescimento econômico e no emprego?	Modelo de dinâmica do sistema	A descarbonização é possível ao criar economias líquidas em custos e alcançar resultados melhores de crescimento econômico e emprego.
	Mapeamento de Sistemas Orientados por Dados de ODS e Interações de Transição de Energia	Brasil	Que riscos e oportunidades para os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) a transição energética vai criar e como podemos gerenciá-los?	Mapeamento de sistemas (orientado por dados)	A energia eólica inesperadamente interage com uma série de resultados de saúde, água e saneamento.
	A Complexidade Verde e a Competitividade das Exportações da China	China	Em quais produtos os países têm vantagem comparativa e como eles podem ser afetados pela transição energética?	Índice de complexidade verde/ Complexidade econômica	Políticas estratégicas de longo prazo podem levar uma nação a áreas de potencial vantagem comparativa. A China conseguiu fazer isso nas últimas duas décadas, quando sua ascensão como exportadora de produtos verdes foi ainda mais significativa do que como principal fabricante global.
Finanças	Preenchendo a Lacuna do Financiamento Verde no Reino Unido: Transição para Eletricidade de Baixo Carbono e Implicações Econômicas	Reino Unido	Quais são as implicações macroeconômicas de uma transição de eletricidade de baixo carbono no Reino Unido implementada em conjunto com e sem uma política projetada para preencher a lacuna do financiamento verde?	Modelo de dinâmica do sistema	Preencher a lacuna do financiamento verde num cenário de energia de baixo carbono leva a benefícios casados de menores custos do sistema de energia e desemprego, ao mesmo tempo que aumenta o PIB.
	Opções de Saída para Investimentos em Energia Renovável no Brasil	Brasil	Como a análise de “opções de saída” pode apoiar o financiamento privado de projetos de energias renováveis.	Modelagem financeira	A incerteza na avaliação financeira de projetos individuais de energia renovável é um fator-chave para a aplicação de opções de saída pelos credores e, apesar de ser relativamente desconhecido no país, esse método de avaliação de projetos é relevante para impulsionar o setor de renováveis brasileiro.

ESTUDO DE CASO:

Projeção de custos das tecnologias de energia com base em evidências empíricas

RUPERT WAY (UNIVERSIDADE DE OXFORD), MATTHEW IVES (UNIVERSIDADE DE OXFORD), PENNY MEALY (BANCO MUNDIAL/UNIVERSIDADE DE OXFORD), J. DOYNE FARMER (UNIVERSIDADE DE OXFORD)

Questão de política: Quanto custará a transição energética?

Região: Global

Métodos: Curvas de experiência estocásticas usadas para produzir previsões probabilísticas de custo de tecnologia de energia e um modelo de sistema de energia simples.

Principais conclusões: É provável que a transição energética economize trilhões de dólares americanos para a economia global, e a economia será maior se a transição ocorrer rapidamente.

Engajamento: Devido ao seu escopo global, este trabalho tem sido amplamente divulgado junto a muitos parceiros na arena política e na mídia. Os destaques incluem: introdução de uma revisão líquida zero pelo governo do Reino Unido, apresentada na Comissão de Energia da Califórnia, discussões com a Casa Branca e funcionários do Departamento de Estado dos EUA e apresentação em meios de comunicação em todo o mundo (por exemplo, BBC, Asian Times, Guardian, New Yorker, Bloomberg).

Resumo: Os autores combinam uma abordagem de análise de dados bem validada para prever custos de tecnologia de energia com um modelo de sistema de energia simples que considera quanto pode custar a transição energética em escala global. Em contraste com muitos modelos tradicionais, os autores concluem que a transição energética, e especialmente uma transição rápida, provavelmente economizará trilhões de dólares americanos para a economia global.

Introdução

As decisões sobre como e quando descarbonizar o sistema global de energia são altamente influenciadas pelas estimativas de custos. A maioria dos modelos de economia de energia produziu cenários de transição energética que superestimam os custos devido à subestimação das melhorias nos custos de energia renovável e nas taxas de adoção.

Este estudo de caso³⁹ apresenta previsões probabilísticas de custo de tecnologias de energia usando um método validado estatisticamente em dados de mais de 50 tecnologias. Usando essa abordagem para estimar os custos do sistema de energia, descobrimos que uma rápida transição para a energia verde provavelmente resultará em trilhões de economia líquida. Mesmo sem contabilizar os danos climáticos ou os benefícios casados da política climática, é provável que a transição para um sistema de energia líquida zero até 2050 seja economicamente benéfica. Este método de previsão de custos também pode ser útil para informar escolhas políticas sobre as tecnologias a serem usadas para a descarbonização em diferentes setores.

Abordagem

Para tecnologias que estão experimentando melhorias nos custos, as taxas de melhoria são notavelmente consistentes.⁴⁰ Para essas tecnologias, existem dois métodos dominantes para prever quantitativamente os custos com base em dados históricos. A primeira é uma forma generalizada da lei de Moore, que diz que os custos caem exponencialmente em função do tempo. A segunda é a lei de Wright, que prevê que os custos caem como uma lei de potência da produção cumulativa. Focamos na lei de Wright porque ela satisfaz a intuição básica de que exercer maior esforço induz a maiores efeitos. No entanto, repetimos todos os nossos experimentos de modelagem usando a lei de Moore e chegamos às conclusões qualitativas semelhantes.

A lei de Wright costuma ser usada para gerar previsões pontuais, o que significa que a previsão é uma função determinística da experiência, sem

estimativa de erro. As primeiras tentativas de introduzir erros não forneciam formas funcionais a priori, o que tornava proibitivos os requisitos de dados para testes fora da amostra.^{41 42} Mais recentemente, foram derivadas estimativas de erro a priori que predizem a precisão da previsão em função das taxas de melhoria histórica e da volatilidade e do número de pontos de dados disponíveis para previsão.^{43 44} Com base em amplos testes, esse método demonstrou gerar estimativas probabilísticas confiáveis de custos futuros. Isso foi feito selecionando datas de referência no passado e, usando apenas os dados disponíveis na época, fazendo previsões em todos os horizontes de tempo de até 20 anos no futuro com relação a cada data de referência. Usando dados históricos para 50 tecnologias diferentes, com base em cerca de 6.000 previsões, a precisão da previsão observada empiricamente correspondeu às estimativas derivadas a priori em todos os horizontes de tempo de até 20 anos à frente.^{45 46} Nossa principal contribuição neste trabalho é a aplicação sistemática deste método – que chamamos de curva de experiência estocástica ou lei estocástica de Wright – à transição energética.

Testando nossa abordagem para prever custos

Para testar a precisão do método da curva de experiência estocástica para prever custos de tecnologias de energia, nós o aplicamos a dados históricos para eletrolisadores solares, eólicos, baterias e membrana de eletrólito polimérico (PEM) (ver Figura 12). Os dados anteriores a cada ano de previsão foram usados para estimar parâmetros, depois os dados de implantação observados nos anos subsequentes foram usados para gerar previsões condicionadas à experiência. As previsões para energia solar, eólica e baterias são razoáveis: a maioria dos valores futuros está dentro do intervalo de confiança (IC) de 95%, consistente com as estimativas de erro a priori. Devido ao conjunto de dados curto e à alta volatilidade histórica, as previsões para eletrolisadores não são tão precisas, mas os intervalos de confiança capturam isso.

³⁹ Este estudo de caso é baseado em Way, R. et al. (2022). Empirically Grounded Technology Forecasts and the Energy Transition. *Joule* 6(9): 2057-2082.

⁴⁰ Farmer, J.D and Lafond, F. (2016). How Predictable is Technological Progress? *Res. Policy* 45: 647-665.

⁴¹ Nagy, B. et al. (2013). Statistical Basis for Predicting Technological Progress. *PLoS One*, 8 (2013): Article e52669.

⁴² Alberth, S. (2008). Forecasting Technology Costs Via the Experience Curve—Myth or Magic? *Technol. Forecasting Soc. Change*, 75, 952-983.

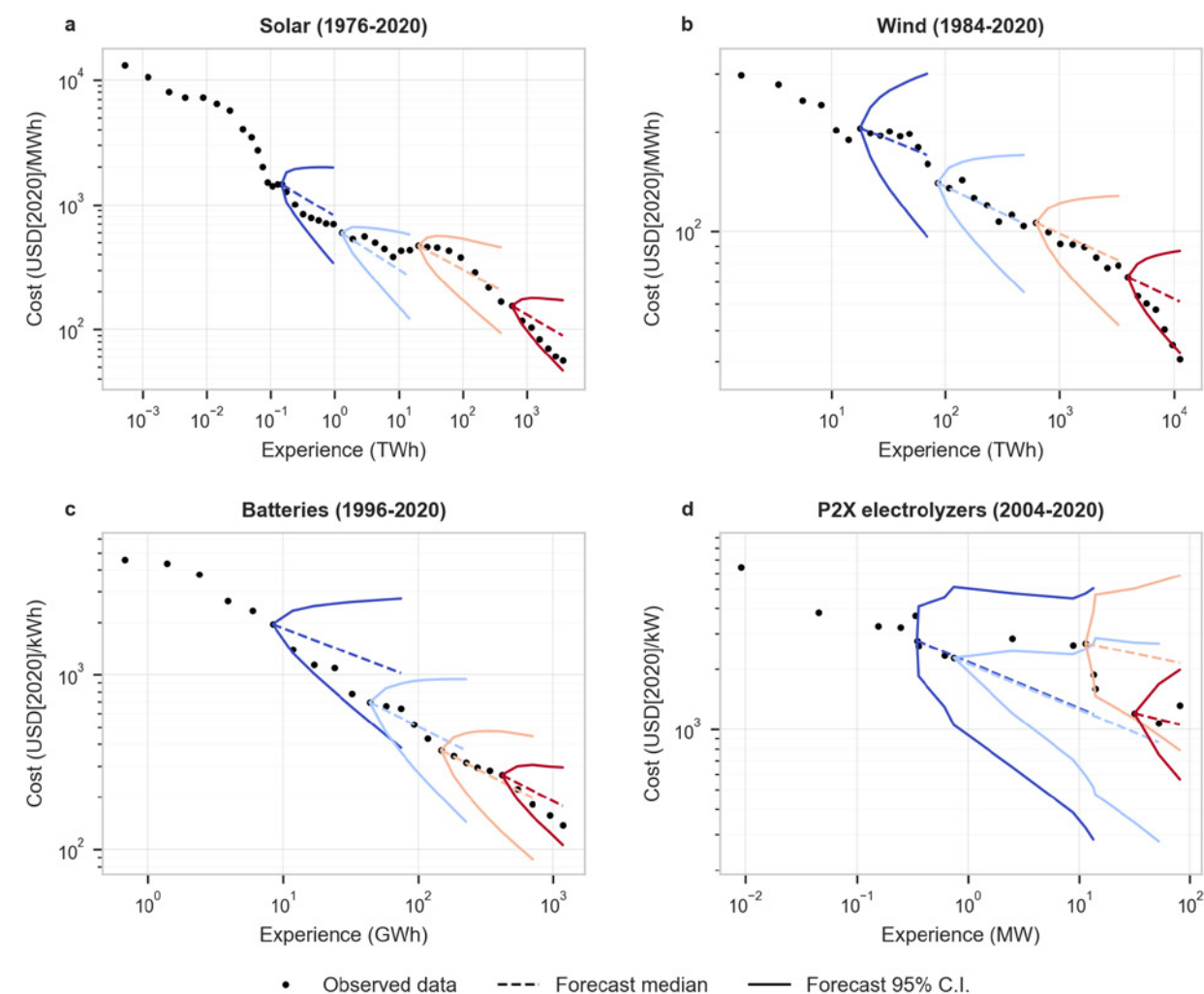
⁴³ Mercure, J.-F. et al. (2021). Risk-opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal. *Global Environmental Change* 70: 102359.

⁴⁴ Lafond, F. et al. (2018). How Well do Experience Curves Predict Technological Progress? A method for making distributional forecasts. *Technol. Forecasting Soc. Change* 128 (2018): pp. 104-117.

⁴⁵ Mercure, J.-F. et al. (2021). Risk-opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal. *Global Environmental Change* 70: 102359.

⁴⁶ Grubb, M. et al. (2021). The New Economics of Innovation and Transition: Evaluating Opportunities and Risks, EEIST report to COP26.

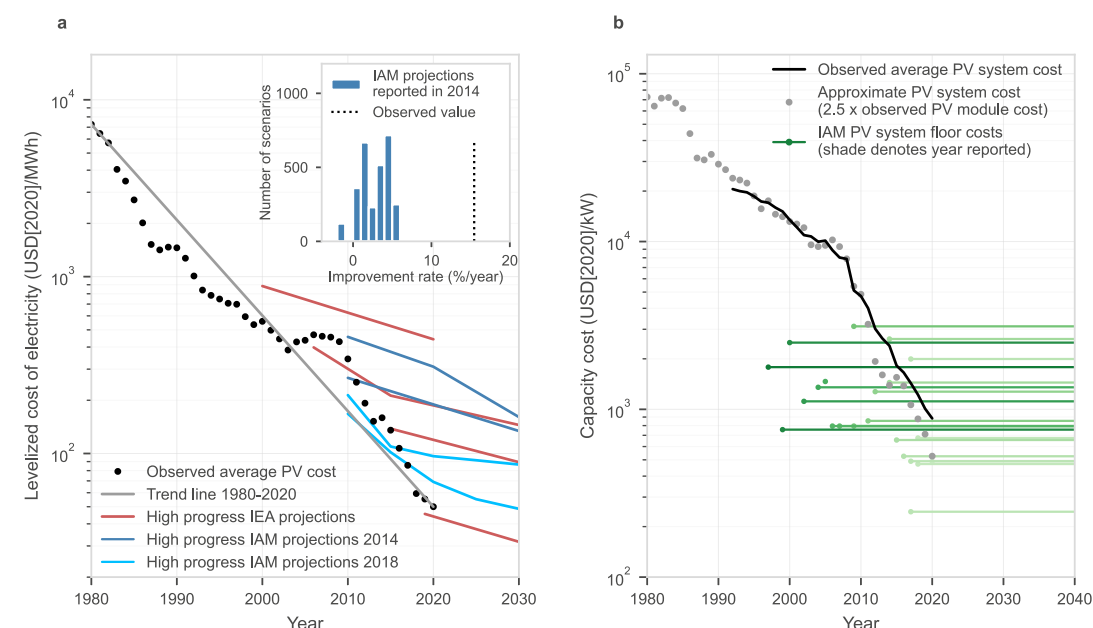
Figura 12: Desempenho histórico do método de previsão da curva de experiência estocástica. As previsões são feitas em intervalos regulares, usando custos anteriores e dados de implantação para calibrar o modelo e dados de implantação “futura” para gerar as previsões. As medianas de previsão e os intervalos de confiança (ICs) de 95% são mostrados, e as cores indicam o ano de previsão, do mais antigo (azul escuro) ao mais recente (vermelho). Os custos são LCOEs para energia solar e eólica e custos de capacidade para baterias e eletrolisadores. Os eletrolisadores P2X são considerados eletrolisadores PEM aqui.



É instrutivo comparar a precisão dessas previsões com os resultados de modelos influentes de economia energética global. Modelos de avaliação integrada (*integrated assessment models* – IAM) são usados para avaliar políticas e gerar cenários para adoção e custo que sejam consistentes com determinadas metas climáticas sob a hipótese de tomada de decisão ótima por parte dos agentes econômicos.

Seus resultados são normalmente chamados de “projeções” para indicar que não se destinam a ser usados como previsões. A Figura 13 enfatiza esse ponto. A Figura 13A mostra projeções anteriores de custos de energia solar fotovoltaica (*solar photovoltaics* – PV) pelo modelo mundial de energia da Agência Internacional de Energia (IEA) e vários IAMs e os compara com os dados observados.

Figura 13: Projeções históricas de custos de PV e custos mínimos. (A) Os pontos pretos mostram o LCOE médio global observado. As linhas vermelhas são projeções LCOE relatadas pela IEA;⁴⁷ as linhas azuis escuras são projeções LCOE do modelo de avaliação integrada (IAM) relatadas em 2014;⁴⁸ e as linhas em azul claro são as projeções do IAM relatadas em 2018.^{49,50} As projeções do IAM estão enraizadas em 2010, apesar de terem sido produzidas em anos posteriores. As projeções apresentadas são exclusivamente trajetórias de custo de “alto progresso tecnológico” extraídas dos cenários de mitigação mais agressivos, correspondendo às maiores reduções de custo projetadas utilizadas nesses modelos. O encarte compara um histograma das taxas compostas de redução anual projetadas dos custos de investimento do sistema fotovoltaico de 2010 a 2020 com o que realmente ocorreu (com base em todos os 2.905 cenários para os quais os dados estão disponíveis).⁵¹ B) Custos mínimos do sistema fotovoltaico implementados em uma ampla gama de IAMs. As cores indicam o ano em que o custo mínimo foi relatado, variando de 1997 (verde escuro) a 2020 (verde claro). Os custos observados do sistema fotovoltaico também são mostrados. O custo dos módulos fotovoltaicos dimensionados por um fator constante de 2,5 é fornecido como referência.



As projeções apresentadas correspondem aos cenários com as políticas climáticas mais agressivas e os maiores índices de inovação tecnológica, ou seja, aqueles que produzem os maiores índices de implantação de tecnologias verdes essenciais e as reduções de custos mais otimistas. No entanto, seus custos projetados têm sido consistentemente muito mais altos do que as tendências históricas.

Isso deixa claro que teria sido uma má ideia tratar essas projeções como previsões condicionais. Em contraste, o método da curva de experiência estocástica produz previsões condicionais confiáveis de precisão conhecida (e uma previsão publicada dos custos solares de 2020, feita em 2010 usando a versão determinística da lei de Wright, foi de fato muito mais precisa do que qualquer uma das projeções IAM ou IEA feitas no momento).⁵² Um dos objetivos neste trabalho é ilustrar como tais previsões são úteis para o planejamento da transição energética.

A lei de Wright é amplamente utilizada para gerar projeções de custo de tecnologia em IAMs. No entanto, é normalmente usada em conjunto com restrições ad hoc, como limites de taxa de adoção e custos mínimos, ou seja, níveis fixos abaixo dos quais os custos nunca devem cair. Como os IAMs usam custos para determinar a implantação (e vice-versa) e muitos permitem uma previsão perfeita, são necessárias restrições para evitar que declínios acentuados de custos devido à lei de Wright levem a soluções nas quais as principais tecnologias verdes são implantadas mais rapidamente do que é física ou socialmente plausível. É difícil saber quais restrições são realistas, o que leva a escolhas ad hoc que influenciam fortemente os resultados. A imposição de restrições excessivamente fortes é provavelmente uma razão importante pela qual as projeções desses modelos não corresponderam ao registro histórico.

⁴⁷ IEA. World Energy Outlook 2021. Technical report. International Energy Agency (2021).

⁴⁸ Riahi, K. et al. (2015). Locked into Copenhagen Pledges – Implications of Short-Term Emission Targets for the Cost and Feasibility of Long-Term Climate Goals. Technol. Forecasting Soc. Change 90 (2015): 8-23.

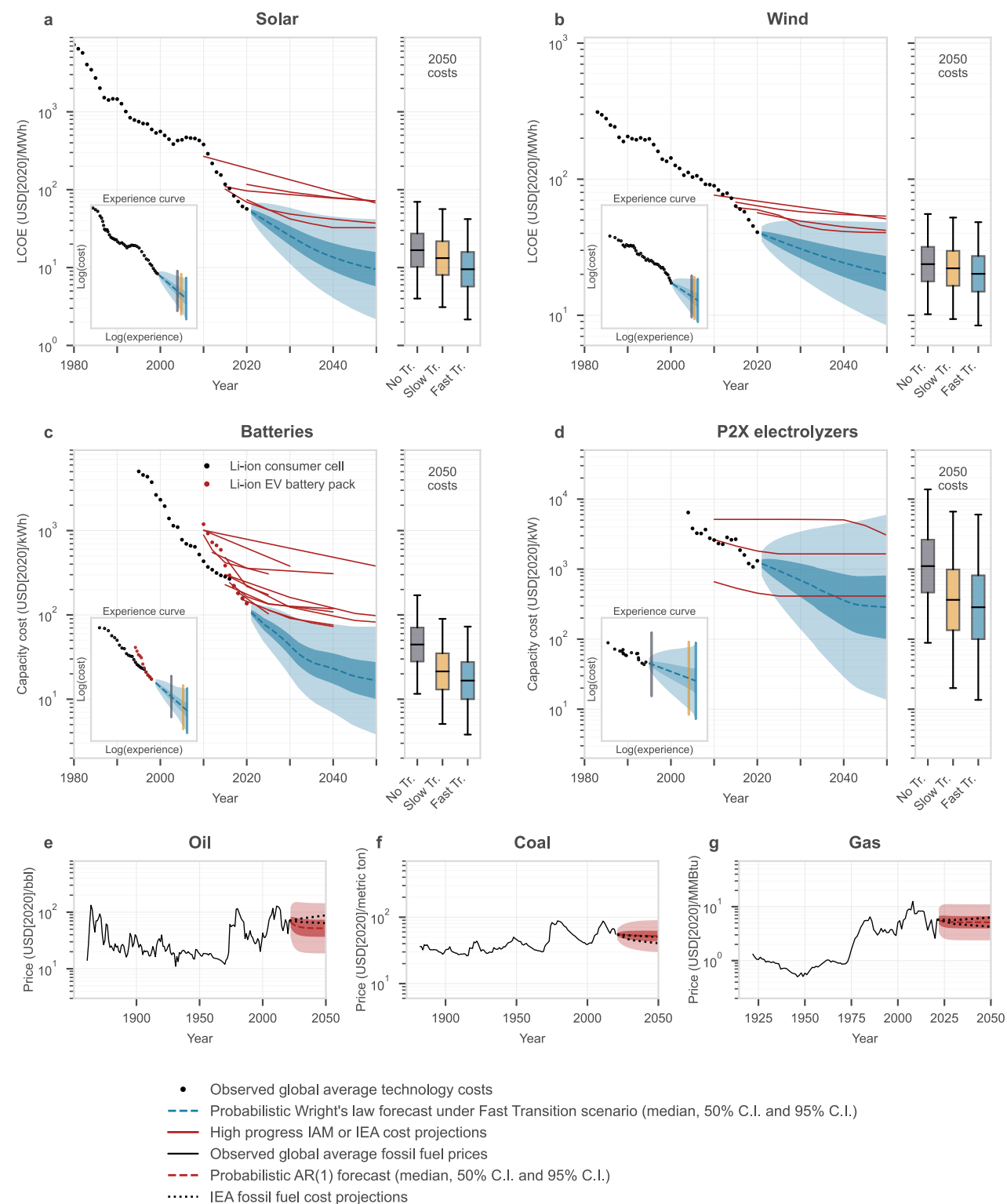
⁴⁹ Krey, V. et al. (2019). Looking Under the Hood: A Comparison of Techno-Economic Assumptions Across National and Global Integrated Assessment Models. Energy, 172 (2019): 1254-1267.

⁵⁰ Huppmann, D. et al. (2019). IAMC 1.5°C Scenario Explorer and Data Hosted by IIASA. Technical report, IIASA (2019).

⁵¹ Riahi, K. et al. (2015). Locked into Copenhagen Pledges – Implications of Short-Term Emission Targets for the Cost and Feasibility of Long-Term Climate Goals. Technol. Forecasting Soc. Change 90 (2015): 8-23.

⁵² Ferguson, C.D. et al. (2010). A US Nuclear Future? Nature, 467: 391-393.

Figura 14: Previsões de custo de tecnologia. (A–D) Os painéis principais mostram distribuições de previsão de custo sob o cenário de Transição Rápida para energia solar fotovoltaica, eólica, baterias e eletrolisadores PEM; o intervalo de confiança (IC) de 50% é azul escuro e o IC de 95% é azul claro. Também são mostradas várias projeções recentes e passadas representativas correspondentes a cenários de mitigação “otimistas” feitos pelos IAMs e pela IEA (linhas vermelhas) (ver Figura 13). Para baterias, tanto as células de consumo de íons de lítio (Li-ion) quanto as baterias de veículos elétricos (EV) de íons de lítio são mostradas, embora seus custos agora tenham convergido; nossas previsões são baseadas em células de consumo, enquanto as projeções da IEA mostradas são baseadas em baterias EV. Os boxplots nos painéis à direita comparam as previsões de custos em 2050 nos cenários Sem Transição, Transição Lenta e Transição Rápida. As inserções mostram curvas de experiência histórica e previsões, com taxas de aprendizado independentes do cenário, e linhas verticais que indicam o quanto cada tecnologia se move para baixo na curva de experiência probabilística em cada cenário. (E–G) Esses painéis mostram previsões de custos probabilísticos para petróleo, carvão e gás com base no modelo de série temporal AR(1).



Previsões probabilísticas de custos para tecnologias individuais

Aplicamos os métodos discutidos até agora para fazer previsões de custos e preços futuros de energia. Para gerar previsões de curva de experiência, os parâmetros para cada tecnologia foram estimados a partir de dados históricos. Em seguida, especificamos cenários para a adoção futura de cada tecnologia em função do tempo e prevemos uma distribuição de custos futuros. Definimos três cenários de adoção representativos. O primeiro cenário é consistente com a transição do sistema de energia dos combustíveis fósseis por volta de 2050 e, portanto, nomeamos esse cenário de implantação de “transição rápida”. O segundo cenário é consistente com a eliminação dos combustíveis fósseis por volta de 2070, por isso o rotulamos de “transição lenta”. O cenário final é consistente com os combustíveis fósseis continuando a dominar o sistema de energia, então o chamamos de “sem transição”.

A Figura 14 mostra previsões probabilísticas para sete importantes tecnologias energéticas. Os painéis principais das Figuras 14A–D mostram previsões para as principais tecnologias verdes no cenário de Transição Rápida, que são feitas usando a versão estocástica da lei de Wright. As inserções mostram custos versus experiência e enfatizam que os custos médios se desenvolvem de forma idêntica em função da experiência em todos os cenários. Os painéis laterais das Figuras 14A–D ilustram que, de acordo com a lei de Wright, as distribuições de previsão dependem do cenário; como resultado, em uma transição mais rápida, provavelmente alcançaremos custos mais baixos mais cedo. Cada tecnologia da lei de Wright inicialmente segue sua tendência atual de custos decrescentes exponencialmente, mas o progresso diminui à medida que sua taxa de implantação cai. Para gerar previsões de custo de combustível fóssil, um modelo autorregressivo (AR(1)) foi calibrado para dados observados. Para combustíveis fósseis, os parâmetros do modelo dependem de dados anteriores, mas as previsões são independentes da implantação; portanto, cada tecnologia tem uma única previsão em todos os cenários.

A Figura 14 também mostra uma seleção de projeções de custos futuros relatadas pelos estudos IAM e IEA. Como antes, mostramos apenas suas projeções mais otimistas. Consistente com o comportamento histórico desses modelos ilustrados na Figura 13, as projeções de custo são altas em relação às tendências históricas. Eles também são todos substancialmente mais altos do que nossas medianas de previsão.

A adoção correspondente a essas projeções de custos não é a mesma que usamos para fazer nossas previsões; portanto, não são perfeitamente comparáveis. No entanto, como mostram os painéis do boxplot, as disparidades persistem em todos os nossos cenários, incluindo Sem Transição. Isso deixa claro que nossas previsões de custos são, apesar de tudo, significativamente mais baixas do que aquelas usadas nesses influentes modelos de economia de energia.

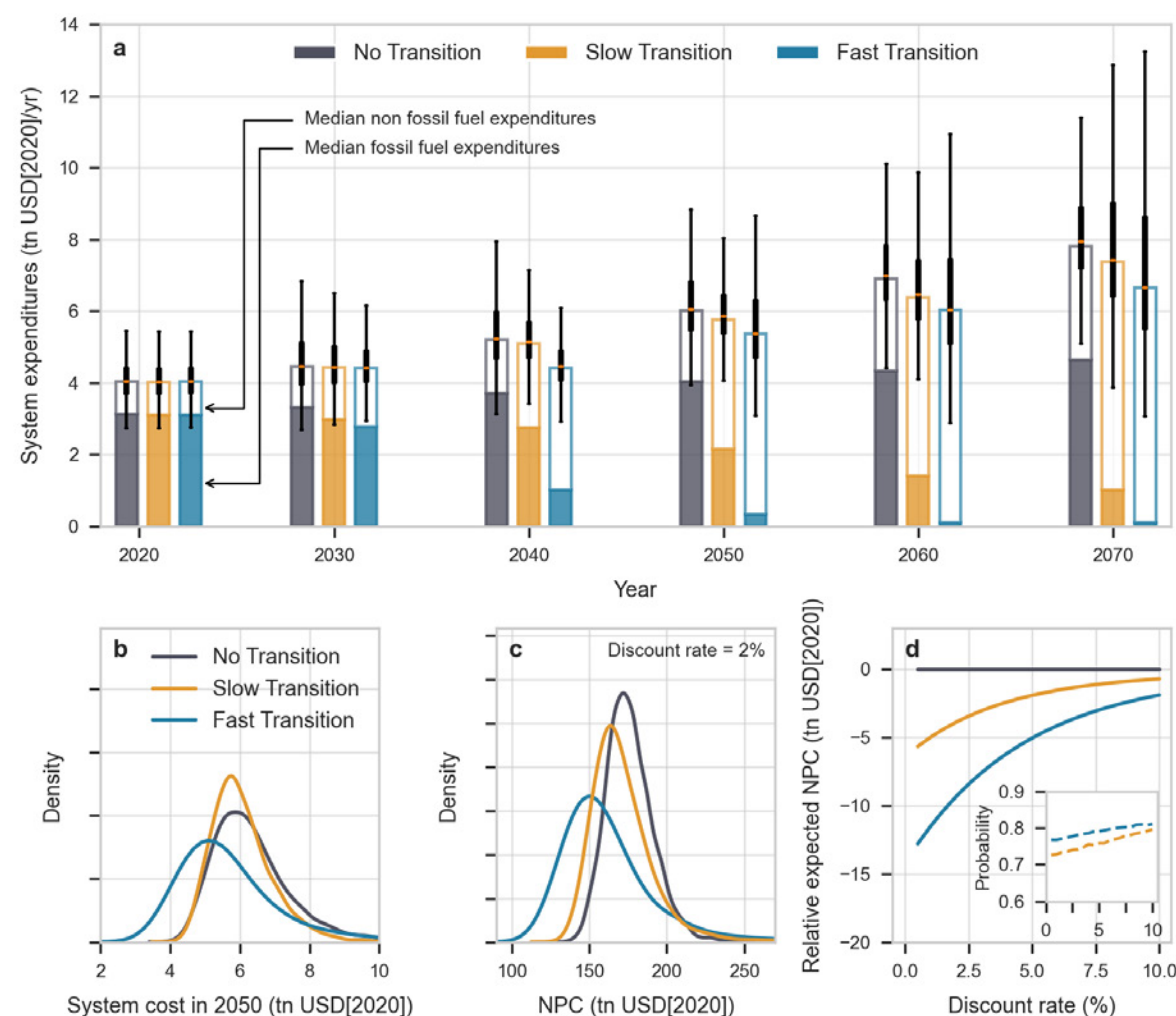
De tecnologias únicas a custos totais do sistema

Para prever os custos prováveis da transição de energia verde e explorar como a incerteza nos custos de tecnologia individual se propaga até a incerteza nos custos do sistema, construímos um modelo simples e transparente do sistema de energia global com base em cenários de adoção de tecnologia bem definidos. Usamos os três cenários de transição apresentados acima. Para obter mais detalhes sobre esses cenários e a implementação de nosso modelo de sistema de energia simples, consulte Way et al.⁵³

Para aplicar nossos métodos probabilísticos de previsão de custo de tecnologia em um determinado cenário, empregamos uma abordagem de Monte Carlo, simulando muitas trajetórias de custos futuros diferentes e, em seguida, descontando exponencialmente os custos futuros para calcular o custo presente líquido esperado (*net present cost* - NPC) do cenário até 2070. Figura 15A mostra os custos anuais do sistema ao longo do tempo para cada cenário. Os gráficos de caixa preta representam as distribuições de previsão de custo total, enquanto as barras coloridas mostram as despesas medianas por grupo de tecnologia. Isso mostra como, no cenário de Transição Rápida, os gastos são transferidos rapidamente dos combustíveis fósseis para as principais tecnologias verde

⁵³ Way, R. et al. (2022). Empirically Grounded Technology Forecasts and the Energy Transition. *Joule*. 6(9), 2057-2082.

Figura 15: Custos por cenário. (A) As barras coloridas mostram os gastos anuais médios em tecnologias de combustíveis fósseis e não fósseis em cada cenário em trilhões de dólares (tn USD). Os boxplots mostram a mediana e a faixa interquartil (IQR) do total de despesas anuais, e os bigodes se estendem da caixa em 1,5 vezes o IQR. (B) Distribuições de previsão do custo anual do sistema em 2050 para cada cenário. (C) Distribuições de previsão do custo presente líquido (net present cost - NPC) de cada cenário, para uma taxa de desconto fixa de 2 por cento. (D) Custo presente líquido esperado de cada cenário em relação ao cenário Sem Transição, em função da taxa de desconto. A inserção mostra a probabilidade de que os NPCs da Transição Rápida e da Transição Lenta sejam menores que os da Sem Transição, em função da taxa de desconto.



A Figura 15B mostra as distribuições anuais de previsão de custo do sistema em 2050. A substituição rápida de tecnologias de combustíveis fósseis por tecnologias verdes de baixo custo – em energia e transporte em particular – faz com que o custo anual esperado do sistema de energia em 2050 para o cenário de Transição Rápida seja \$ 514 bilhões mais barato do que para o cenário Sem Transição, embora a distribuição de custos possíveis para a Transição Rápida seja mais ampla. Depois de 2050, conforme mostrado na Figura 15A, enquanto a mediana e a amplitude interquartil (IQR) permanecem relativamente baixas, a incerteza da Transição Rápida em relação à Sem Transição aumenta. Se os custos estiverem no limite superior da faixa de incerteza, alternativas mais baratas seriam usadas; não estamos levando isso em consideração, o que é uma desvantagem do nosso método.

A Figura 15C mostra a distribuição prevista do NPC de cada cenário a uma taxa de desconto fixa de 2%. Embora haja uma incerteza considerável, é provável que o NPC da Transição Rápida seja um pouco menor do que o da Sem Transição. Por outro lado, a Transição Lenta não é tão barata quanto a Transição Rápida. Isso ocorre porque os altos gastos atuais com combustíveis fósseis continuam por décadas, e as economias das principais tecnologias verdes só são percebidas muito mais tarde. No entanto, também gera economia em relação ao cenário Sem Transição. Da mesma forma que na Figura 15B, a distribuição do NPC da Transição Rápida é mais ampla do que a da Sem Transição. Embora isso seja causado por maior incerteza tecnológica, é importante observar que esse aumento de incerteza é compensado pelo deslocamento para a esquerda na distribuição, devido a quedas de custo esperadas associadas à ampliação das principais tecnologias verdes.

A Figura 15D mostra como o NPC esperado de cada cenário varia com a taxa de desconto em relação ao cenário Sem Transição. A inserção mostra que há cerca de 80% de chance de que o NPC da Transição Rápida seja menor do que o da Sem Transição, independentemente da taxa de desconto. Análises anteriores sugeriram que fazer uma transição rápida para tecnologias de energia limpa fazer ou não sentido econômico depende da taxa de desconto. Porém, aqui mostramos um resultado impressionante: a Transição Rápida provavelmente será muito mais barata com todas as taxas de

desconto razoáveis. Usando a taxa de desconto social de 1,4% recomendada na Stern Review,⁵⁴ por exemplo, a economia atual líquida esperada é de aproximadamente US\$ 12 trilhões. À taxa de desconto mais alta de 5%, a economia esperada é de cerca de US\$ 5 trilhões.

Conclusão

A crença de que a transição para a energia verde será cara tem sido um dos principais estímulos da resposta ineficaz à mudança climática nos últimos 40 anos. Esse pessimismo está em desacordo com as tendências de melhoria de custos tecnológicos do passado e corre o risco de aprisionar a humanidade em um futuro energético caro e perigoso. Enquanto os argumentos para uma rápida transição verde citam benefícios como a prevenção de danos climáticos, redução da poluição do ar e menor volatilidade do preço da energia, esses benefícios são frequentemente contrastados com discussões sobre os custos associados à transição. Nossa análise sugere que é improvável que tais compensações existam: um sistema de energia global mais verde, mais saudável e mais seguro provavelmente também será mais barato. A atualização das expectativas para um melhor alinhamento com as evidências históricas pode mudar fundamentalmente o debate sobre a política climática e acelerar drasticamente o progresso para descarbonizar os sistemas de energia em todo o mundo.

Embora sejamos críticos em relação a algumas suposições dos IAMs, acreditamos que nossa abordagem é complementar a desses modelos, baseando-se diretamente nas tendências históricas e, assim, fornecendo um contrapeso às projeções dos IAMs. Demonstramos que as restrições comumente usadas em IAMs são provavelmente uma causa importante da incompatibilidade de suas projeções com dados históricos. Trabalhos futuros podem explorar como a suavização dessas restrições dentro dos IAMs muda suas projeções. Queremos enfatizar que, ao contrário dos IAMs, não estamos tentando encontrar soluções ótimas. É provável que existam outros cenários que sejam mais baratos do que o cenário de Transição Rápida, que foi construído para explorar se (com implantação suficientemente rápida) uma transição rápida pode gerar economia de custo líquido e, em caso afirmativo, com que probabilidade.

⁵⁴ Stern, N. (2007). The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge University Press.

ESTUDO DE CASO:

Opções de políticas para descarbonização rápida e suave e o crescimento sustentável

FRANCESCO LAMPERTI (SCUOLA SUPERIORE SANT'ANNA) AND ANDREA ROVENTINI (SCUOLA SUPERIORE SANT'ANNA)

Questão de política: Quais pacotes de políticas climáticas são melhores para promover e sustentar a transição energética sem desestabilizar o sistema econômico e o orçamento público?

Escopo: Global

Método: Modelo baseado em agente

Principais conclusões: As políticas de precificação de carbono sozinhas são ineficazes para ficar abaixo da meta de 2° C, mas uma mistura de restrições a combustíveis fósseis, subsídios à infraestrutura pública e políticas de padrões de eletrificação mostra um forte potencial para promover a redução do crescimento de emissões e ao mesmo tempo aumentar o crescimento e manter a estabilidade macrofinanceira, embora com (baixo) impacto fiscal. No entanto, um pequeno imposto sobre o carbono pode ser adicionado ao mix de políticas para acelerar ainda mais a transição e neutralizar seu impacto no orçamento público.

Engajamento: Este estudo de caso se beneficiou de vários feedbacks recebidos com frequência dos stakeholders, formuladores de políticas e pesquisadores em várias rodadas de interações, particularmente no Brasil. Como tal, partes das questões de pesquisa, instrumentos de política testados e variáveis de resultado foram decididos conjuntamente com os stakeholders políticos.

Resumo: Os autores usam uma simulação dinâmica para examinar como combinações alternativas de políticas climáticas podem promover e sustentar a transição energética e reduzir as emissões sem desestabilizar o sistema econômico e o orçamento público. Eles usam um modelo de avaliação integrado baseado em agente macrofinanceiro calibrado na economia global para simular pacotes de políticas dentro de uma economia complexa em evolução com empresas heterogêneas em interação e desequilíbrio persistente.

Introdução

Os impactos climáticos estão aumentando rapidamente e provavelmente desestabilizarão os sistemas socioeconômicos e naturais sob a atual trajetória de emissões.^{55 56} É necessário um conjunto de políticas para combater o aquecimento global e alcançar o crescimento sustentável; no entanto, as promessas atualmente pactuadas são insuficientes para cumprir os objetivos do Acordo de Paris. Para reduzir as emissões, as economias devem reduzir a intensidade de suas emissões de carbono, afastar-se da energia de combustíveis fósseis e do capital físico relacionado e promover uma revolução tecnológica climática em menos de três décadas. Em um cenário adverso, a transição para uma economia de baixo carbono ocorre de forma tardia ou abrupta, sendo os custos dessa transformação potencialmente altos e sistêmicos.^{57 58 59 60} De fato, os formuladores de políticas enfatizam cada vez mais a necessidade de encontrar o equilíbrio certo entre uma transição rápida e os atritos macroeconômicos que ela acarreta,^{61 62} bem como as oportunidades de crescimento de longo prazo que ela pode gerar.⁶³ No entanto, embora haja um amplo consenso sobre a urgência da ação climática para mitigar os riscos das mudanças climáticas descontroladas, as evidências sobre o pacote de políticas adequado para induzir uma transição eficaz e ordenada são escassas e a dependência excessiva de instrumentos de política de baixa aceitabilidade política,⁶⁴ como a precificação do carbono, traz preocupações quanto às perspectivas de transição.^{65 66 67}

Usando para a simulação um modelo de avaliação integrado baseado em agente macrofinanceiro calibrado para a economia global, Lamperti et al.⁶⁸ e Wieners et al.⁶⁹ comparam combinações alternativas de políticas climáticas dentro de uma economia

complexa em evolução em desequilíbrio persistente, examinando a capacidade de promover e sustentar a transição e explorar oportunidades tecnológicas sem desestabilizar o sistema econômico e o orçamento público. Os resultados mostram que as políticas de precificação de carbono sozinhas são ineficazes para ficar bem abaixo da meta de 2° C. De fato, os níveis atuais de tributação do carbono são inadequados para o escopo, enquanto os preços do carbono altos o suficiente para induzir uma transição rápida, se utilizados como único instrumento de política, têm efeitos potencialmente desestabilizadores na macroeconomia. Por outro lado, uma mistura de regulações e subsídios para investimentos e P & D em tecnologias de energia verde pode colocar a economia em um caminho de crescimento sustentável em que todos saem ganhando. Nosso modelo captura a mudança tecnológica endógena sob profunda incerteza e dependência de caminho, em contraste com abordagens mais tradicionais que não logram captar esses fatores. Nossos resultados decorrem de uma combinação de políticas que abordam uma gama mais ampla de barreiras à mudança rápida do sistema de forma mais direta do que a precificação do carbono, que se concentra apenas na externalidade do carbono e atua principalmente por meio de sinais de mercado. Nesse contexto, a tributação do carbono pode ser efetivamente usada para financiar gastos públicos verdes sem prejudicar as perspectivas de crescimento. As políticas orientadas para missões atuam como uma ferramenta sinérgica com a política climática e têm o potencial de facilitar a mudança para uma nova trajetória de crescimento de baixo carbono.^{70 71} Também são necessários investimentos para melhorar as capacidades de longo prazo e as capacidades dinâmicas do governo para adaptar prontamente a resposta pública diante das mudanças

⁵⁵ Coronese, M. et al. (2019). Evidence for Sharp Increase in the Economic Damages of Extreme Natural Disasters. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(43):21450–21455.

⁵⁶ Palagi, E. et al. (2022). Climate Change and the Nonlinear Impact of Precipitation Anomalies on Income Inequality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(43):e2203595119.

⁵⁷ van der Ploeg, F. (2020). Macro-Financial Implications of Climate Change and the Carbon Transition. Presented at the Session "Implications of Fundamental Global Changes for Central Banks" of the ECB Forum on Central Banking, 11–12 November 2020.

⁵⁸ Mercure, J.-F. et al. (2018). Macroeconomic Impact of Stranded Fossil Fuel Assets. *Nature Climate Change*, 8(7): 588–593.

⁵⁹ Battiston, S. et al. (2017). A Climate Stress-Test of the Financial System. *Nature Climate Change*, 7(4): 283–288.

⁶⁰ Semieniuk, G. et al. (2021). Low-Carbon Transition Risks for Finance. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 12(1): e678.

⁶¹ Carney, M. (2015). Breaking the Tragedy of the Horizon—Climate Change and Financial Stability. Speech given at Lloyd's of London 29: 220–230.

⁶² NGFS (2019). NGFS First Comprehensive Report: A Call For Action – Climate change as a source of financial risk.

⁶³ Mercure, J.-F. et al. (2021). Risk-Opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal. *Global Environmental Change*, 70: 102359.

⁶⁴ Stern, N. and Stiglitz, J. E. (2021). The social cost of carbon, risk, distribution, market failures: An alternative approach.

⁶⁵ Lilliestam, J. and Patt, A. (2018). The Case against Carbon Prices. *Joule*, 2(12):2494–2498.

⁶⁶ Pezzey, J. C. V. (2019). Why the Social Cost of Carbon will Always be Disputed. 10(1): e558. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/wcc.558>.

⁶⁷ Rosenbloom, D. et al. (2020). Opinion: Why Carbon Pricing is not Sufficient to Mitigate Climate Change — and How "Sustainability Transition Policy" Can Help. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(16): 8664–8668.

⁶⁸ Lamperti, F. et al. (2020). Green Transitions and the Prevention of Environmental Disasters: Market-Based vs. Command- and-Control Policies. *Macroeconomic Dynamics*, 24(7):1861–1880; Lamperti, F. et al. (2021). Three Green Financial Policies to Address Climate Risks. *Journal of Financial Stability*, 54: 100875.

⁶⁹ Lamperti, F. et al. (2022). Macroeconomic Policies to stay below 2°c with Sustainable Growth. Technical report, LEM Working Papers. Forthcoming.

⁷⁰ Dosi, G. et al. (2021). Mission-oriented Policies and the 'Entrepreneurial State' at Work: An agent-based exploration. LEM Working Paper Series.

⁷¹ Lamperti, F. et al. (2019). The Green Transition: Public Policy, Finance, and the Role of the State. *Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung/Quarterly Journal of Economic Research* 88(2): 73–88.

climáticas e outros desafios sociais prementes (Lamperti et al., 2019b). Políticas macroprudenciais e de crédito adequadamente projetadas promovem a estabilidade macrofinanceira diante dos riscos climáticos, ao mesmo tempo em que mitigam levemente o crescimento das emissões, embora seu escopo seja limitado em termos absolutos (Lamperti et al., 2021).⁷² No geral, nossos resultados sugerem que grandes pacotes de políticas e investimentos baseados em metas políticas confiáveis e atitudes de governos orientadas para a missão e de risco têm o potencial de promover caminhos em que todos saem ganhando, caracterizados por rápida descarbonização e altas taxas de emprego e crescimento sustentável no longo prazo.

Métodos

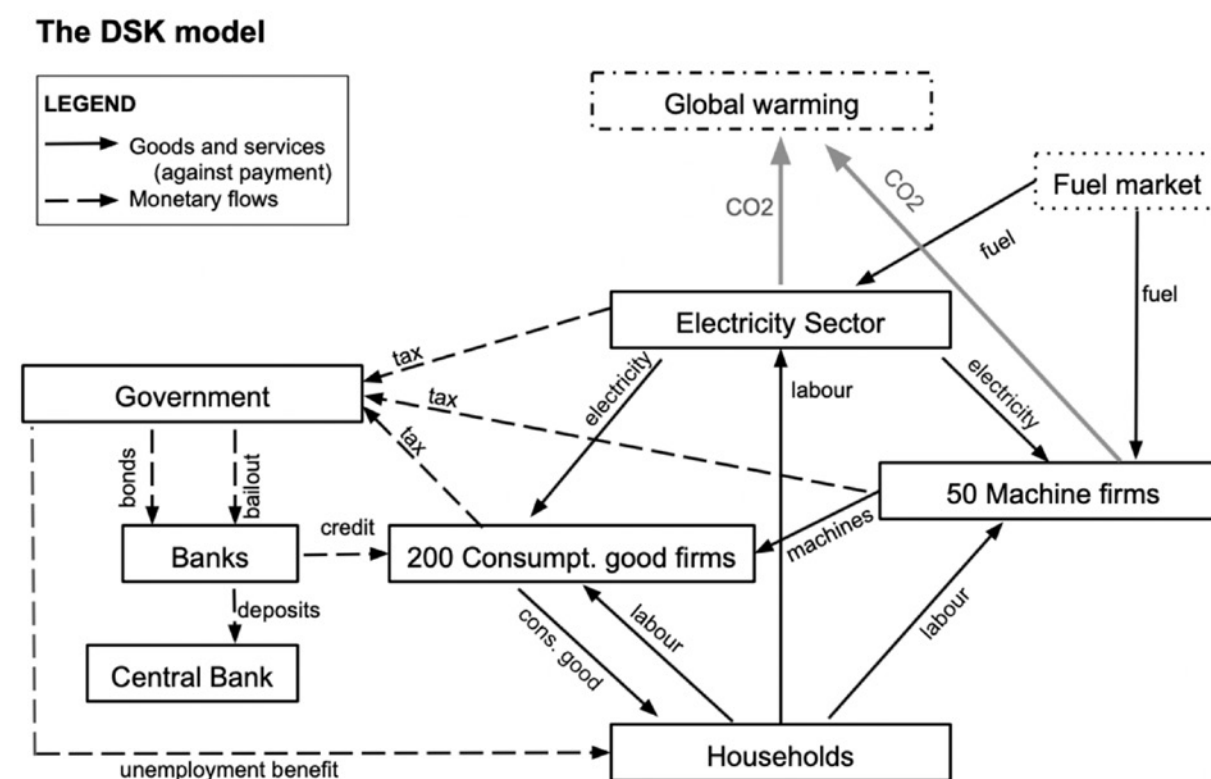
Para testar os riscos e oportunidades de políticas climáticas alternativas para a macroeconomia no curto e médio/longo prazo, contamos com o modelo Dystopian Schumpeter Meeting Keynes (DSK)⁷³. O modelo DSK é um modelo de simulação baseado em agentes que representa uma economia global em

coevolução com interações dinâmicas com o meio ambiente e o clima (ver Figura 16). Em particular, o modelo compreende bens de capital e de consumo heterogêneos e interativos cuja produção requer insumos de energia e trabalho e pode precisar de crédito fornecido por um setor bancário. As empresas de bens de capital também realizam atividades de P&D destinadas a melhorar a eficiência dos processos de produção. No setor de energia, as usinas de energia dependem de fontes de baixo carbono ou de combustíveis fósseis para fornecer eletricidade à economia. As empresas decidem quanto produzir, quantos trabalhadores contratar, que investimentos fazer, quanto financiamento externo pedir e como buscar novas tecnologias; os bancos decidem quanto crédito oferecer, em quais condições e para quais clientes e, além disso, exigem títulos do governo; diferentemente, os consumidores ganham salários e dividendos e demandam bens finais. O governo implementa a política fiscal, de inovação e energética, e um banco central administra a política monetária e macroprudencial. As emissões antrópicas decorrem da

produção de bens e energia. As emissões acumuladas estão ligadas aos aumentos de temperatura através de um único modelo climático. O modelo foi equipado para fornecer uma microfundação estocástica de danos climáticos, que são modelados como uma série de choques heterogêneos que afetam várias características de empresas, consumidores e usinas de energia (Lamperti et al., 2018, 2019).⁷⁴ A característica distintiva do modelo é que ele acopla um motor de crescimento schumpeteriano com mudança técnica endógena afetada pela incerteza knightiana e dependência de trajetória com uma abordagem keynesiana de gerenciamento de demanda e um setor financeiro composto por bancos comerciais heterogêneos. Todas essas características são enquadradas em termos de rotinas comportamentais e interações descentralizadas – que passaram por um processo de validação empírica, ver Fagiolo et al. (2019)⁷⁵ – entre uma ecologia de agentes limitadamente racionais diante de um ambiente em evolução. Nesse modelo, a descarbonização efetiva depende de como as políticas afetam o ritmo e a direção da inovação e como lidam com a informação assimétrica que afeta cada mercado.

uma política que dobra o preço do combustível fóssil fornece um limite mínimo aproximado para produzir algum efeito visível ao escapar da dependência da trajetória de tecnologias intensivas em emissões. Nossos resultados apontam para a dificuldade de superar a inércia no processo de busca e adoção de tecnologia simplesmente elevando o preço do carbono. De fato, a profunda incerteza em torno da inovação e do processo de busca por novas tecnologias torna os preços um sinal ruim para direcionar rapidamente a mudança tecnológica. Isso é verdade tanto para setores intensivos em energia quanto, ainda mais acentuadamente, para aqueles em que os custos de energia são relativamente baixos. Por outro lado, verifica-se que os preços elevados do carbono fomentam a instabilidade econômica, induzindo um aumento acentuado das taxas de desemprego e um aumento das falências de empresas, traduzindo-se numa recessão transitória, mas prolongada. De fato, colocar um preço no carbono aumenta os custos variáveis de produção e torna a adoção tecnológica mais difícil; esses efeitos aumentam a fragilidade financeira e reduzem a demanda agregada. Quando o preço do carbono é suficientemente alto para aumentar o preço dos combustíveis fósseis em cerca de 2,8 vezes (um valor que seria necessário para obter uma transição rápida o suficiente para cumprir a meta de 2°), uma crise torna-se substancialmente mais provável. Embora os esquemas de reciclagem de receitas direcionados para empresas (para cobrir custos) ou famílias (para sustentar o consumo) amenizem esses efeitos adversos, eles não fornecem seguro total para a economia. Combinando esses dois resultados, Wieners et al. descobrem que aumentar exponencialmente os prazos de precificação de carbono – frequentemente defendidos no DICE e em outros modelos de avaliação integrados convencionais (consulte, por exemplo, Nordhaus, 2019, 2014)⁷⁷ – incorrem no risco de emparelhar a ineficácia no curto prazo com o aumento da instabilidade econômica no longo prazo, tornando a transição ainda mais difícil. Essas descobertas sugerem um uso moderado e cuidadoso da precificação do carbono e exigem uma combinação de políticas mais ampla, na qual a taxa sobre o carbono possa ser combinada com outras políticas.

Figure 16: Stylised representation of the DSK model from Wieners et al. (2022).



Resultados e informações sobre políticas

Em Wieners et al (2022) analisamos uma série de esquemas de taxa de carbono implementados dentro do modelo DSK (ver Tabela 7 e Figura 17). Em particular, consideramos a taxa de carbono aumentando o preço do combustível fóssil gradualmente – imitando as políticas sugeridas pela literatura de avaliação integrada de custo-benefício – ou por uma cunha constante.⁷⁶ Os resultados são claros e sugerem que a precificação do carbono – quando implementada isoladamente – pode ser eficaz e arriscada ao mesmo tempo (consulte a Figura 17). Por um lado, a tributação excessivamente baixa de carbono é amplamente ineficaz para desencadear a transição verde nos setores de energia e indústria. Descobrimos que a probabilidade relativa de atingir a meta de 2°C se aproxima de zero quando o formulador de políticas conta com taxas de carbono abaixo de 100% do preço do combustível fóssil. Em outras palavras,

⁷² Lamperti, F. et al. (2021). Three Green Financial Policies to Address Climate Risks. *Journal of Financial Stability* 54: 100875.

⁷³ Lamperti, F. et al. (2018). Faraway, So Close: Coupled Climate and Economic Dynamics in an Agent-based Integrated Assessment Model. *Ecological Economics* 150: 315-339. Bosetti, V., Lamperti, F., Roventini, A., and Tavoni, M. (2019). The Public Costs of Climate-induced Financial Instability. *Nature Climate Change* 9(11): 829-833.

⁷⁴ Dosi, G., Lamperti, F., Napoletano, M., Roventini, A., and Sapio, A. (2018). Faraway, So Close: Coupled Climate and Economic Dynamics in an Agent-based Integrated Assessment Model. *Ecological Economics* 150: 315-339. Lamperti, F. et al. (2019). The Public Costs of Climate-induced Financial Instability. *Nature Climate Change* 9(11): 829-833.

⁷⁵ Fagiolo, G. et al. (2019). Validation of agent-based models in economics and finance. *Computer Simulation Validation*: 763-787. Springer.

⁷⁶ Especificamente, testamos políticas que aumentam o preço dos combustíveis fósseis por um fator que varia de 1 a 15, o que permite estudar preços de carbono coerentes com cenários do IPCC limitando a anomalia de temperatura a 2 graus, bem como políticas mais agressivas. Ao modelar taxas crescentes, consideramos esquemas de impostos exponenciais seguindo as mesmas trajetórias de preços de combustíveis fósseis do modelo DICE de Nordhaus (2017). Detalhes em Wieners et al. (2022).

⁷⁷ Nordhaus, W. (2014). Estimates of the Social Cost of Carbon: Concepts and Results from the DICE- 2013R Model and Alternative Approaches. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 1(1/2): 273-312. Nordhaus, W. (2019). Climate change: The ultimate challenge for economics. *American Economic Review*, 109(6): 1991-2014.

Um amplo conjunto de instrumentos de política com foco em quantidades, regulações, inovação, nudging, influência social, divulgação de informações e abordagens mistas^{78 79} geralmente é deixado de fora da avaliação macroeconômica da política climática. Para preencher essa lacuna, testamos um grande conjunto de combinações, incluindo subsídios para a construção de usinas de energia verde, subsídios de P&D para tecnologias de baixo carbono, regulações que proíbem usinas de combustível fóssil e impõem a eletrificação. Todos os instrumentos foram ainda associados à tributação do carbono para destacar as sinergias políticas (ver Tabela 7 para os principais resultados). Nosso estudo complementa a análise macroeconômica ecológica das políticas para a transição,^{80 81 82 83} oferecendo uma perspectiva *bottom-up* em que o processo de mudança técnica sob profunda incerteza e dependência da trajetória é o principal impulsionador da mudança do sistema. Além disso, oferecemos uma comparação de esquemas de políticas alternativas em várias dimensões, que abrangem a velocidade do processo de descarbonização e vários indicadores de

desempenho macrofinanceiro. Em primeiro lugar, nossos resultados revelam um efeito positivo das políticas de comando e controle que proíbem a construção de usinas de combustível fóssil, bem como o uso de combustível fóssil. Ambas as políticas (rotuladas como B e E na Tabela 7) são implementadas como regulamentos que estabelecem uma proibição a ser aplicada após um período de carência, com as empresas não conformes sendo multadas e forçadas a deixar seus respectivos mercados. Instrumentos desse tipo estão entrando cada vez mais na arena política (por exemplo, a proibição do Reino Unido de caldeiras a gás a partir de 2025) e o efeito macro que eles poderiam produzir em larga escala precisa ser investigado. O período de carência permite às empresas se ajustarem à nova regulação, que se assume crível e de imediata assimilação pelos agentes econômicos. Essas políticas promovem um ritmo mais alto de investimento em tecnologias de baixo carbono, tanto nos setores de energia quanto nos de manufatura, e encorajam um abandono mais rápido de técnicas de produção intensivas em emissões do que outras políticas (por exemplo, taxaço de carbono).

Tabela 7: Consequências macroeconômicas de diferentes políticas climáticas em relação a um cenário de negócios sem política. Análise dos autores com base nos dados coletados em Wieners et al. (2022). Vermelho. Significa reduzido; Inc. para aumento; const. para constante e sub. para subsídio. Fonte: adaptado de Lamperti e Roventini (2022).

Política	Crescimento das emissões		Crescimento de produção		Estabilidade financeira	Déficit público
	Energia	Indústria	Curto prazo	Longo prazo		
Const. imposto de baixo carbono (T)	levemente vermelho.	não afetado	levemente vermelho.	levemente vermelho.	suavemente inc.	meio vermelho.
Const. alto imposto de carbono	vermelho forte.	vermelho.	vermelho forte.	vermelho forte.	vermelho forte.	vermelho.
Imposto de carbono semelhante ao DICE	levemente vermelho.	não afetado	vermelho forte.	vermelho forte.	vermelho forte.	vermelho.
Sub. para plantas verdes (C)	vermelho.	não afetado	inc.	não afetado	suavemente inc.	suavemente inc.
Sub. para P&D verde	levemente vermelho.	não afetado	inc.	suavemente inc.	não afetado	suavemente inc.
Proibição do uso de combustível fóssil (B)	vermelho forte.	vermelho.	levemente vermelho.	não afetado	levemente vermelho.	inc.
Padrão de eletrificação (E)	não afetado	vermelho forte.	vermelho forte.	vermelho.	levemente vermelho.	suavemente inc.
B+E+C	vermelho forte.	vermelho forte.	levemente vermelho.	não afetado	não afetado	inc.
B+E+C+T	vermelho forte.	vermelho forte.	levemente vermelho.	não afetado	não afetado	não afetado

⁷⁸ Hepburn, C. (2006). Regulation by Prices, Quantities, or Both: A review of instrument choice. *Oxford Review of Economic Policy*, 22(2): 226-247.

⁷⁹ Peñasco, C. et al. (2021). Systematic Review of the Outcomes and Trade-Offs of Ten Types of Decarbonization Policy Instruments. *Nature Climate Change*, 11(3): 257-265.

⁸⁰ Mercure, J.F. et al. (2018). Environmental Impact Assessment for Climate Change Policy with the Simulation-Based Integrated Assessment Model E3ME-FTT-GENIE. *Energy strategy reviews*, 20: 195-208.

⁸¹ Monasterolo, I. and Raberto, M. (2019). The impact of Phasing out Fossil Fuel Subsidies on the Low- Carbon Transition. *Energy policy*, 124: 355-370.

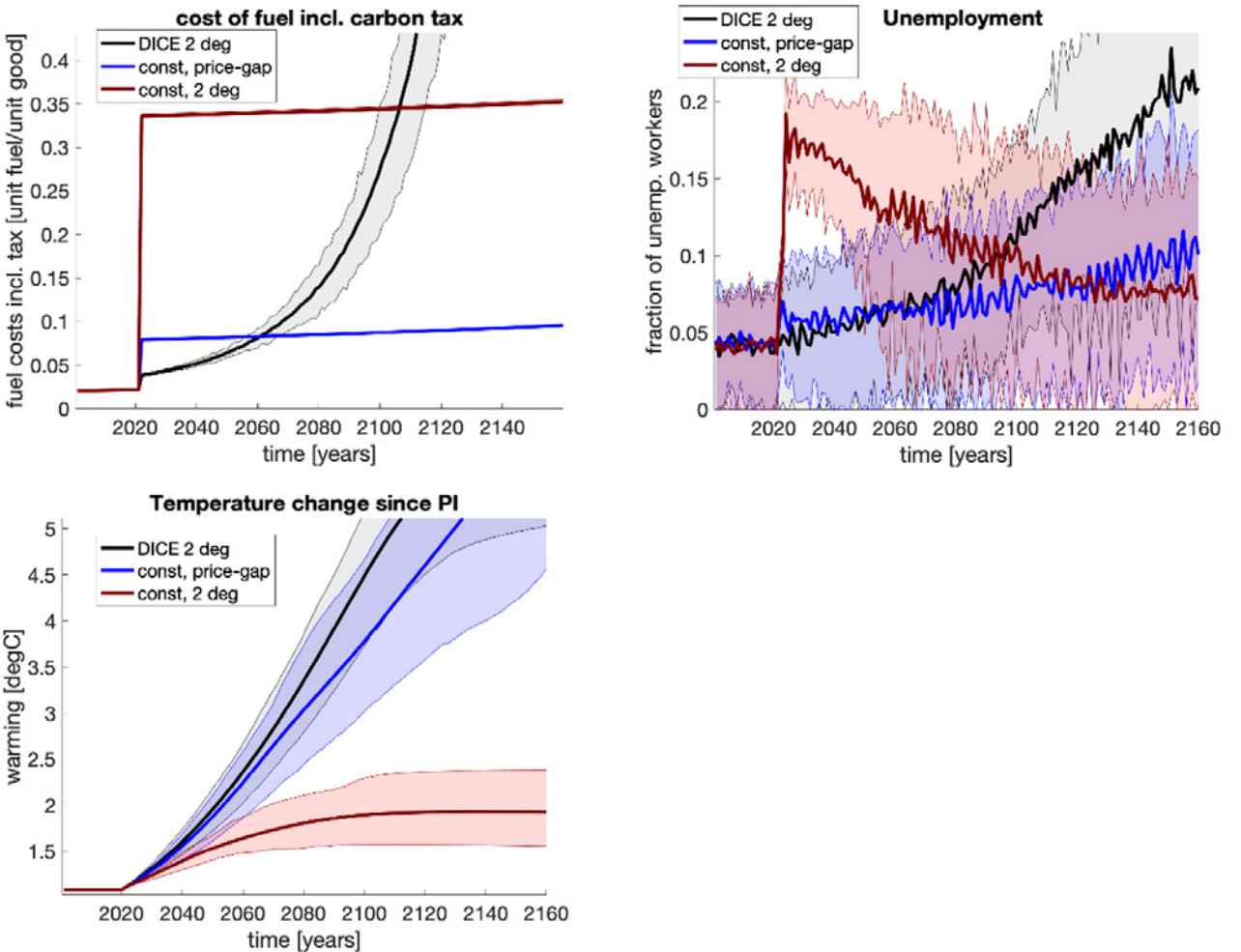
⁸² Dafermos, Y. and Nikolaidi, M. (2019). Fiscal Policy and Ecological Sustainability: A Post-Keynesian Perspective. In *Frontiers of Heterodox Macroeconomics*, 277-322.

⁸³ Rengs, B. et al. (2020). Evolutionary Macroeconomic Assessment of Employment and Innovation Impacts of Climate Policy Packages. *Journal of Economic Behavior and Organisation*. 169: 332-368.

Os subsídios públicos para construção de usinas verdes e P&D verde são outro instrumento chave para a política climática. Eles (i) aceleram a transição no setor de energia, que é crucial para sustentar a adoção de soluções baseadas na eletrificação; e (ii) sustentam a criação de empregos. De fato, o experimento B+C+E (ver Tabela 7) – que combina a proibição de combustíveis fósseis, subsídios públicos à construção verde e padrões de eletrificação – mostra um forte potencial de redução do crescimento de emissões, aumentando o emprego e mantendo a estabilidade macrofinanceira, embora adversamente afetando o déficit público. Em particular, a proibição de combustíveis fósseis e os padrões de eletrificação efetivamente redirecionam o processo de mudança tecnológica para tecnologias de baixo carbono, enquanto os subsídios aceleram a busca e a adoção de inovações. O custo geral induzido por políticas não tributárias no orçamento público é modesto (estimado em cerca de 1,5% [0,5% - 3%] do PIB por ano em um protótipo de país desenvolvido). Para absorver tais custos, diferentes taxas de carbono foram testadas:

em geral, relatamos evidências de um efeito sinérgico da taxaço leve de carbono. De fato, um imposto de carbono relativamente pequeno pode ser adicionado ao mix de políticas para acelerar ainda mais a transição, gerar receitas a partir de empresas com altas emissões e neutralizar o impacto no orçamento público que um mix de políticas composto por regulamentação e gastos públicos verdes teria (experimento B+C+E+T). Simulações numéricas sugerem que um imposto de carbono constante aumentando o preço dos combustíveis fósseis em 2020 por um fator de 2,5 até 2100 pode fornecer receitas para financiar as políticas de inovação, comando e controle e construção de usinas verdes que são cruciais na fase inicial da transição; ao mesmo tempo, essa precificação do carbono é pequena o suficiente para evitar o surgimento de custos de transição significativos no nível macroeconômico. Esses resultados sugerem que uma transição rápida, suave e geradora de empregos é possível, e uma simples combinação de políticas, com instrumentos baseados em preços com uma política industrial ativa, pode alcançá-la.

Figura 17 – O efeito das taxas de carbono na estabilização do clima e na macroeconomia. “DICE 2 deg” imita uma tabela de impostos com a mesma dinâmica do modelo DICE 2017; “const, price-gap” é um imposto constante (em termos reais) suficientemente alto para induzir uma transição no final do século; “const, 2º” é um imposto constante (em termos reais) suficientemente alto para mitigar as emissões e estabilizar o clima de acordo com o Acordo de Paris.



ESTUDO DE CASO:

Renováveis imparáveis e preços marginais na China, Índia e Brasil

PIM VERCOULEN (CAMBRIDGE ECONOMETRICS & UNIVERSIDADE DE EXETER),
FEMKE NIJSSE (UNIVERSIDADE DE EXETER), SIMON SHARPE (CLIMATE CHAMPIONS
TEAM), JEAN-FRANCOIS MERCURE (BANCO MUNDIAL)

Questão de política: Como as barreiras à adoção das energias renováveis variáveis (*variable renewable energy* – VRE) e o desenho dos mercados de eletricidade podem afetar os preços da eletricidade nos sistemas de energia do futuro?

Regiões: Brasil, China, Índia

Método: E3ME- FTT: Geração de energia

Principais conclusões: (1) A superação de barreiras à adoção de fontes de energia renovável variável (VRE) provavelmente leva a mais reduções de preços de eletricidade, independentemente dos mecanismos de preços. (2) Um mecanismo de precificação de eletricidade amplamente alinhado com os custos vitalícios do fornecimento de eletricidade (como um custo médio nivelado ponderado, ou WALC) pode ser capaz de acomodar uma maior aceitação das VREs, reduzindo os preços da eletricidade em comparação com uma abordagem de ordem de mérito (MOA) equivalente. (3) O ponto focal para os formuladores de políticas deve ser minimizar essas barreiras e moldar um mercado adequado para sistemas de energia dominados por tecnologias VRE.

Engajamento: Este trabalho evoluiu após discussões e comparações de modelos com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e outros pesquisadores do Reino Unido com referência ao setor de energia no Brasil e foi ampliado para incluir representação para Índia e China. O trabalho preliminar para a Índia foi apresentado em um workshop organizado pelo The Energy Research Institute (TERI).

Resumo: Os autores usam o modelo E3ME- FTT: Geração de Energia para explorar prováveis configurações futuras de sistemas de energia na China, Índia e Brasil, com foco na eletricidade acessível e no papel do desenho de mercado. O modelo explora o potencial de preços e políticas regulatórias para apoiar a adoção de VREs nesses países.

Introdução

O carvão é a principal tecnologia de geração de energia na Índia e na China.⁸⁴ A eletricidade no Brasil, por outro lado, é fornecida principalmente por usinas hidrelétricas. Nos últimos dois anos, as tecnologias de energia renovável variável (VRE) foram implantadas em ritmo impressionante globalmente, com a China recentemente assumindo a liderança na implantação de turbinas eólicas *offshore*. Entre 2018 e 2021, a energia solar fotovoltaica e a energia eólica onshore quase dobraram de capacidade, na China inclusive. No Brasil, no mesmo período a adoção de energia solar fotovoltaica também cresceu a uma taxa impressionante, mas a capacidade instalada combinada de energia fotovoltaica distribuída e em escala de concessionária ainda era menor do que a da energia eólica onshore. Historicamente, a energia eólica onshore superou a energia solar fotovoltaica no cenário brasileiro devido à disponibilidade de grandes recursos eólicos no Nordeste do país. A aceitação do VRE na Índia também obteve grandes ganhos. A energia solar fotovoltaica também quase dobrou em capacidade, mas a expansão da capacidade eólica onshore ficou para trás.⁸⁵ Essas taxas de adoção de VREs são encontradas em todo o mundo.

É provável que essa tendência de implantação das tecnologias VRE continue e possivelmente acelere à medida que os custos das energias renováveis continuem diminuindo, como aconteceu na última década.⁸⁶ Na maioria das regiões do mundo, as tecnologias VRE estão agora superando as tecnologias convencionais em termos de custo nivelado de eletricidade. No entanto, a aceitação do VRE pode enfrentar obstáculos, como a insuficiência da rede, acesso a financiamento, cadeias de suprimentos atrasadas e resistência de indústrias em declínio.⁸⁷ Outro obstáculo para a aceitação das VREs pode ser como os mercados de eletricidade são projetados.

Uma mudança na dominância da tecnologia de energia provavelmente também terá consequências sobre como os mercados de eletricidade são desenhados. Em muitos mercados liberalizados, os custos marginais de produção em um determinado momento determinam o preço da eletricidade. Isso

é chamado de preço marginal ou abordagem de ordem de mérito (*merit order approach* – MOA) nos mercados de eletricidade. É uma ferramenta eficaz para limpar o mercado, uma vez que a maioria dos sistemas de energia é dominada pela geração de energia de combustível fóssil, onde os custos são devidos à compra de combustível. Ao contrário dos geradores movidos a combustíveis fósseis, o custo das tecnologias VRE é dominado por investimentos iniciais de capital.

Portanto, se as tecnologias VRE continuarem sua trajetória de adoção, o MOA poderá levar os operadores VRE a fornecer eletricidade com prejuízo. Em dias de muito vento ou sol, seus custos marginais (que são próximos de zero) definiriam o preço da eletricidade. Com uma maior difusão de renováveis, isso aconteceria cada vez mais, tornando provável que o MOA não seja um mecanismo de mercado adequado em um futuro sistema elétrico dominado pelas VREs. Por outro lado, os altos preços dos combustíveis fósseis podem levar a lucros inesperados para as empresas de VRE, o que aumenta os preços da eletricidade.

Em mercados como a Índia, os contratos de longo prazo para fornecimento de eletricidade desempenham um papel importante no mercado. Aqui, o pagamento à companhia de eletricidade está mais relacionado aos custos nivelados de eletricidade. Embora os contratos de longo prazo sejam menos flexíveis do que um mercado diário de eletricidade, eles não retratam as desvantagens do sistema MOA descrito acima.

Aqui, procuramos explorar prováveis configurações futuras de sistemas de energia na China, Índia e Brasil, com interesse especial em preços acessíveis de eletricidade e em qual o papel do desenho de mercado. Dada a provável trajetória contínua das VREs e a necessidade de um mecanismo de precificação novo ou atualizado, investigamos vários cenários focados nos sistemas de energia na Índia, China e Brasil usando E3ME-FTT: Geração de Energia.

Examinaremos um cenário de difusão de tecnologia em que a aceitação das VREs encontra resistência adicional além do que as trajetórias atuais sugerem e, como resultado, o uso de combustível fóssil é

⁸⁴ IEA. (2019). World Energy Balances 2019. www.iea.org/statistics/.

⁸⁵ IRENA (n.d.). Data Explorer. <https://www.irena.org/Data>. Accessed on: 19/11/2022.

⁸⁶ IRENA (2021). Renewable Power Generation Costs in 2021, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>

⁸⁷ Nijse, F. J. M. M., et al. (2022). Is a Solar Future Inevitable? Global Systems Institute Working paper series number 2022/02. <https://eeist.co.uk/journalpapers/>

maior (HighFF), e um conjunto de cenários de difusão de tecnologia em que a adoção das VREs poderia potencialmente ser acelerada colocando um limite para os investimentos em combustíveis fósseis (HighVRE). Por fim, cada cenário é exposto a dois mecanismos de precificação diferentes: um que imita o MOA (como costuma ser visto em mercados liberalizados) e um paradigma em que os preços da

eletricidade são formados como o WALC, que serve como um mecanismo de precificação alternativo indicativo que se baseia nos custos vitalícios em vez dos custos marginais de curto prazo. O modelo FTT: Geração de Energia contabiliza o custo de armazenamento e o efeito da redução no LCOE. Consulte a tabela abaixo para obter uma visão geral dos cenários.

Tabela 8: Cenários focados nos sistemas de energia da Índia, China e Brasil usando E3ME- FTT: Geração de Energia.

Nome do cenário	Suposição de difusão	Desenho de mercadoMax
REF-MOA	Difusão de tecnologias segue sua trajetória atual	Abordagem de ordem de mérito (MOA)
HighFF-MOA	Maiores barreiras à adoção das VREs, expressas como taxas de difusão reduzidas para tecnologias VRE	
HighVRE-MOA	Menos barreiras à aceitação das VREs, expressas por um limite máximo de capacidade nas tecnologias FF	
REF-WALC	Difusão de tecnologias segue sua trajetória atual	Média ponderada de custos nivelados (WALC)
HighFF-WALC	Maiores barreiras à absorção das VREs, expressas como taxas de difusão reduzidas para tecnologias VRE	
HighVRE-WALC	Menos barreiras à aceitação das VREs, expressas por um limite máximo de capacidade nas tecnologias FF	

Descrição do E3ME- FTT: Geração de Energia

Descrição do E3ME

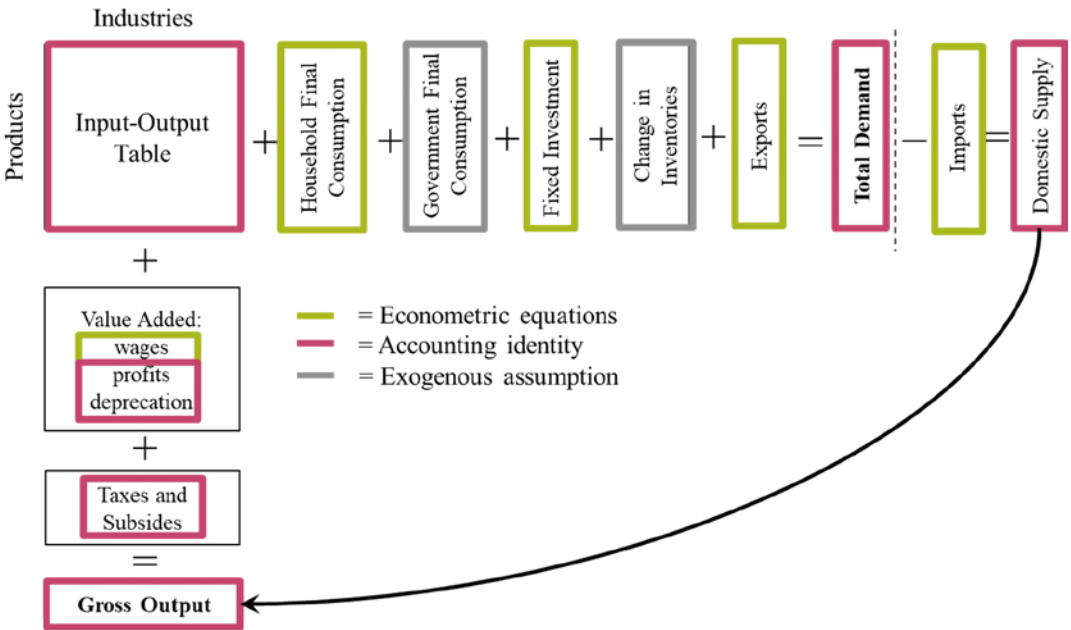
E3ME é um modelo computacional dos sistemas econômicos e energéticos do mundo e do meio ambiente. A atividade econômica realizada por pessoas, famílias, empresas e outros grupos da sociedade tem efeitos sobre outros grupos (possivelmente após um intervalo de tempo) e os efeitos podem persistir nas gerações futuras. Porém, os atores são muitos e os efeitos – tanto benéficos quanto prejudiciais – se acumulam nos estoques econômicos e físicos. Uma descrição detalhada pode ser encontrada *online*.⁸⁸

Os efeitos das transações econômicas entre os agentes são transmitidos através do meio ambiente, da economia e do sistema monetário e de preços (através dos mercados de trabalho e commodities) e das redes globais de transporte e informação. Os mercados transmitem efeitos de três maneiras

principais: por meio do nível de atividade, criando demanda por insumos de material, combustível e mão de obra; por meio de salários e preços que afetam os rendimentos; e por meio de rendas que, por sua vez, levam a novas demandas por bens e serviços. Essas interdependências sugerem que um modelo E3 deve ser abrangente e incluir muitos vínculos entre diferentes partes dos sistemas econômico e energético – por isso o E3ME foi projetado com alta resolução geográfica e setorial.

O E3ME-FTT é um modelo global que abrange 71 regiões com as principais economias representadas individualmente e distingue 70 setores econômicos em países europeus e 44 em países não europeus. O E3ME é um modelo macroeconômico orientado pela demanda. Ele determina os componentes da demanda usando econometria de séries temporais para resolver os componentes da demanda final e vários outros indicadores. Veja a Figura 18. Os parâmetros econométricos representam o comportamento passado e atual em resposta a choques.

Figura 18: Estrutura das contas nacionais da E3ME.



O domínio da energia também é determinado por relações econométricas e se baseia em algumas das identidades contábeis apresentadas acima, mas também inclui respostas à inovação endógena e aos preços da energia. Os preços das energias não renováveis no atacado é formada através de uma abordagem de curva de custo-fornecimento que integra um parâmetro de incerteza. Os impostos são então adicionados em cima disso.

O papel da tecnologia no modelo E3ME-FTT

Compreender por que e como os agentes econômicos escolhem as tecnologias é importante nas questões que envolvem a descarbonização da economia. As equações econométricas de séries temporais requerem um longo histórico para simular o futuro. Para novas tecnologias, tal história não existe e, portanto, as equações econométricas não são totalmente adequadas para lidar com as transições induzidas pela tecnologia. É aqui que o *Future Technology Transformations* (FTT) entra em cena. O FTT corresponde a um conjunto de modelos integrados ao E3ME que descrevem a tomada de decisões tecnológicas nas indústrias com maior emissão e uso intensivo de energia, como geração de energia,⁸⁹ ferro e aço,⁹⁰ aquecimento doméstico⁹¹ e veículos de passeio.⁹²

O modelo FTT segue a economia evolutiva que determina que os regimes sociotécnicos (por que algo é feito da maneira que é feito) mudam devido a pressões internas (por exemplo, inovação) e externas (por exemplo, escassez ou políticas), e essa mudança é frequentemente irreversível e não marginal. O FTT incorpora a incerteza em seus parâmetros de entrada, o que representa o caráter heterogêneo dos agentes econômicos, bem como a incerteza fundamental.

O FTT determina a configuração da tecnologia para atender a demanda determinada em outra parte do modelo E3ME-FTT. O núcleo baseia-se na função do replicador Lotka-Volterra, que compara todas as tecnologias em pares e considera as preferências do investidor (determinadas como um *logit* binário), frequências de substituição de tecnologia e participações de mercado do ano anterior como entradas para determinar as participações de mercado de o ano atual.⁹³ Inclui *feedback* positivo, como aprender fazendo com base no incremento de capacidade de tecnologia cumulativa global, e *feedback* negativo devido a restrições setoriais, como implantação de VREs no setor de energia, levando a incompatibilidades entre oferta e demanda, ou disponibilidade de sucata sendo limitada para reciclagem no setor siderúrgico.

⁸⁸ Cambridge Econometrics (2022). E3ME Model Manual. Available at: <https://www.e3me.com/what/e3me/>

⁸⁹ Mercure, J. F. (2012). FTT: Power: A global model of the power sector with induced technological change and natural resource depletion. *Energy Policy* 48: 799-811.

⁹⁰ Vercoolen, P. et al. (2018). Decarbonizing the East Asian steel industry in 2050. Meijo University Discussion Paper #0008.

⁹¹ Knobloch, F. et al. (2021). FTT: Heat - A Simulation Model for Technological Change in the European Residential Heating Sector. *Energy Policy* 153: 112249.

⁹² Lam, A., and Mercure, J-F. (2015). The Effectiveness of Policy on Consumer Choices for Private Road Passenger Transport Emissions Reductions in Six Major Economies. *Environmental Research Letters*, 10(6): 064008.

⁹³ Mercure, J-F. (2015). An Age Structured Demographic Theory of Technological Change. *Journal of Evolutionary Economics*, 25(4): 787-820.

Como o E3ME difere de outros modelos?

O E3ME é frequentemente comparado aos modelos de equilíbrio geral computável (*computable general equilibrium* - CGE) ou equilíbrio geral estocástico discreto (*discrete stochastic general equilibrium* - DSGE).^{94 95} Em muitos aspectos, as abordagens de modelagem são semelhantes; eles são usados para responder a perguntas semelhantes e usam entradas e saídas semelhantes. No entanto, há importantes diferenças teóricas subjacentes entre essas abordagens de modelagem. Modelos como o E3ME se baseiam em dados e tentam inferir relações econômicas a partir deles. A maioria dos outros modelos macroeconômicos ou de avaliação integrada (IAMs) tenta se basear em teorias e fundamentos micro.

Em uma estrutura típica de modelos CGE e DSGE, o comportamento de otimização é assumido, a produção é determinada por restrições do lado da oferta e os preços se ajustam totalmente para que toda a capacidade disponível seja usada. No E3ME, a determinação da produção vem do lado da demanda da economia e é possível ter capacidade econômica ociosa. Não se assume que os preços sempre se ajustam aos níveis de equilíbrio do mercado.

As diferenças têm implicações práticas importantes, porque significam que no E3ME a regulação e outras políticas podem potencialmente levar a aumentos na produção, se forem capazes de aproveitar a capacidade econômica disponível. O papel do setor financeiro é fundamental.

O papel das finanças

O E3ME é um modelo pós-keynesiano e, dentro desta escola de pensamento, o dinheiro é considerado endógeno – ou seja, pode ser criado por bancos, por exemplo, por meio de empréstimos. Essa abordagem difere daquela em muitos outros modelos em que a oferta de moeda é fixa.⁹⁶ Uma oferta fixa de dinheiro implica o efeito de *crowding-out*, enquanto a oferta endógena de dinheiro, por si só, não. O modelo E3ME é, portanto, agnóstico em matéria de finanças. Ele acompanha as necessidades de investimento de um determinado setor em função das relações econométricas ou dos resultados do FTT, mas não informa se o financiamento demandado está acessível.

Resultados

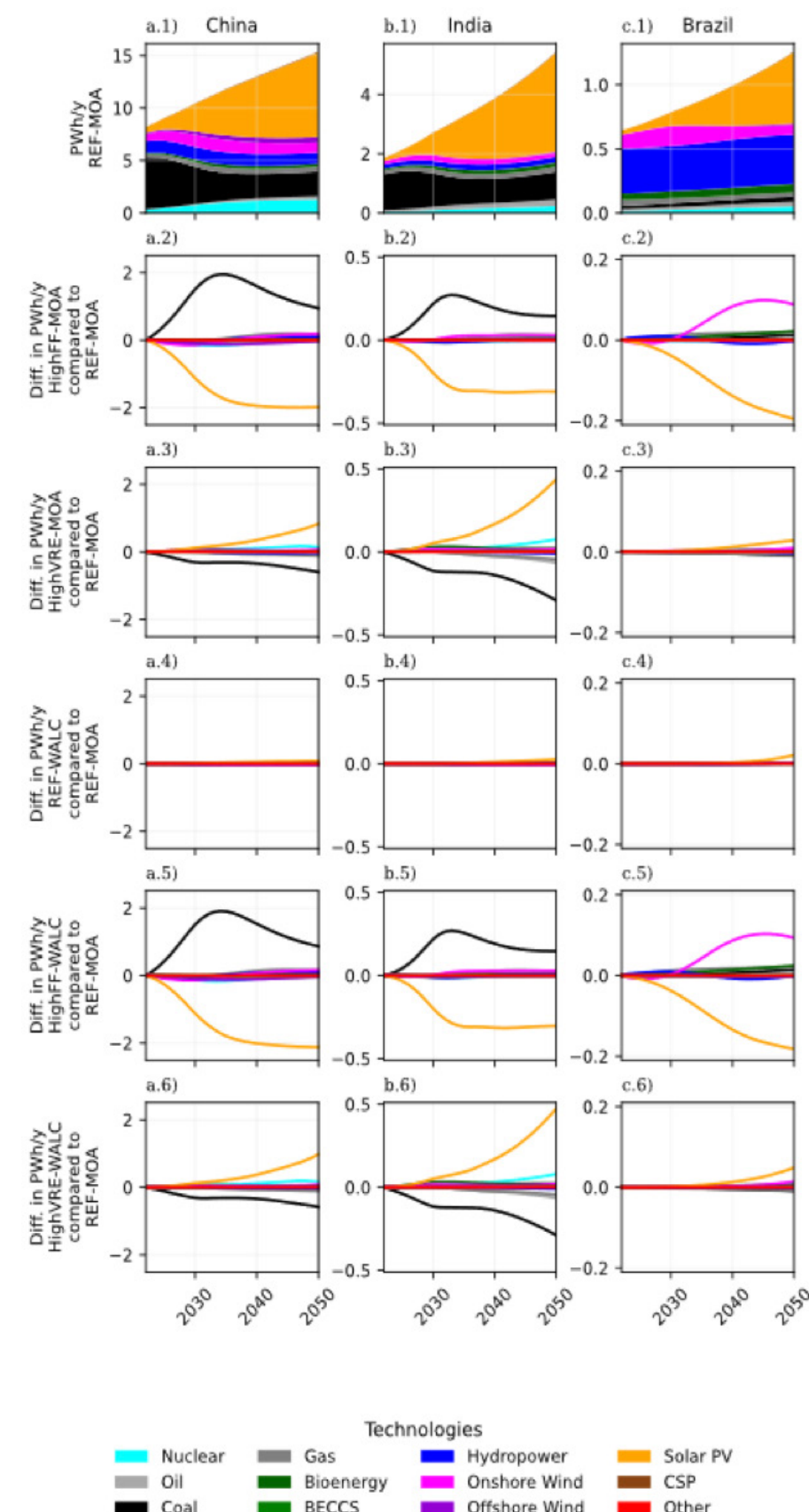
Mix de tecnologias de geração de energia

Em todos os países de interesse, o FTT: Geração de Energia simula uma trajetória de difusão contínua de tecnologias VRE nos cenários de referência (REF-MOA e REF-WALC), em linha com a dinâmica de difusão passada e contínuas reduções de custos (ver Figura 18). A energia solar fotovoltaica, em particular, ganha impulso à medida que os custos continuam diminuindo para a própria tecnologia e para as tecnologias de armazenamento que facilitam a adoção da VRE. É provável que a energia solar fotovoltaica supere a energia eólica ou qualquer alternativa em um futuro próximo. Isso é esperado no Brasil, por exemplo, onde a energia eólica tem sido historicamente a tecnologia VRE mais popular. Devido à expansão da capacidade das VRE, os combustíveis fósseis devem diminuir, principalmente na China e na Índia.

No entanto, se as tecnologias VRE encontrarem barreiras adicionais que impeçam sua adoção (consulte a Figura 18, HighFF -MOA e HighFF -WALC), a aceitação das VREs será um pouco mais lenta, o que beneficia a geração de energia movida a combustíveis fósseis. A exceção é o Brasil. Aqui, uma desaceleração no tempo de construção das fontes renováveis beneficia a energia eólica. A energia solar começa com uma pequena participação de mercado e, quando o tempo de construção é tão longo, a indústria não consegue crescer tão rápido em termos absolutos quanto no caso da eólica. No entanto, ainda se projeta que o total das fontes renováveis no Brasil diminua e a energia movida a combustíveis fósseis aumente marginalmente. Menos VRE também significa menos capacidade de armazenamento necessária, o que reduz as perdas de eletricidade e, portanto, reduz o fornecimento necessário para atender à demanda.

Nos cenários em que as tecnologias VRE enfrentam menos obstáculos e a geração de energia a partir de combustíveis fósseis é considerada um investimento menos atraente, então – como esperado – há um aumento da aceitação das renováveis. A maior relutância em construir novas usinas de combustível fóssil cria espaço para tecnologias VRE. Esse efeito é maior na Índia, devido à rápida taxa de crescimento da demanda de eletricidade. No Brasil, o efeito é pequeno, pois as tecnologias VRE competem com projetos de energia de longa duração, como usinas hidrelétricas, e a demanda por eletricidade cresce em ritmo mais lento.

Figura 19: Geração de energia por tecnologia nos países analisados. A linha superior mostra os níveis absolutos de geração, enquanto todas as linhas subsequentes abaixo mostram as diferenças na geração por tecnologia em comparação com o cenário REF-MOA.



⁹⁴ Mercure, J.-F., et al. (2019). Modelling Innovation and the Macroeconomics of Low-Carbon Transitions: Theory, Perspectives and Practical Use. *Climate Policy* 19(8): 1019-1037.

⁹⁵ Lefevre, J., et al. (2022). Global Socio-Economic and Climate Change Mitigation Scenarios Through the Lens of Structural Change. *Global Environmental Change* 74: 102510.

⁹⁶ Mercure, J.-F and Pollitt, H. (2018). The Role of Money and the Financial Sector in Energy-Economy Models used for Assessing Climate and Energy Policy. *Climate Policy* 18(2): 184-197.

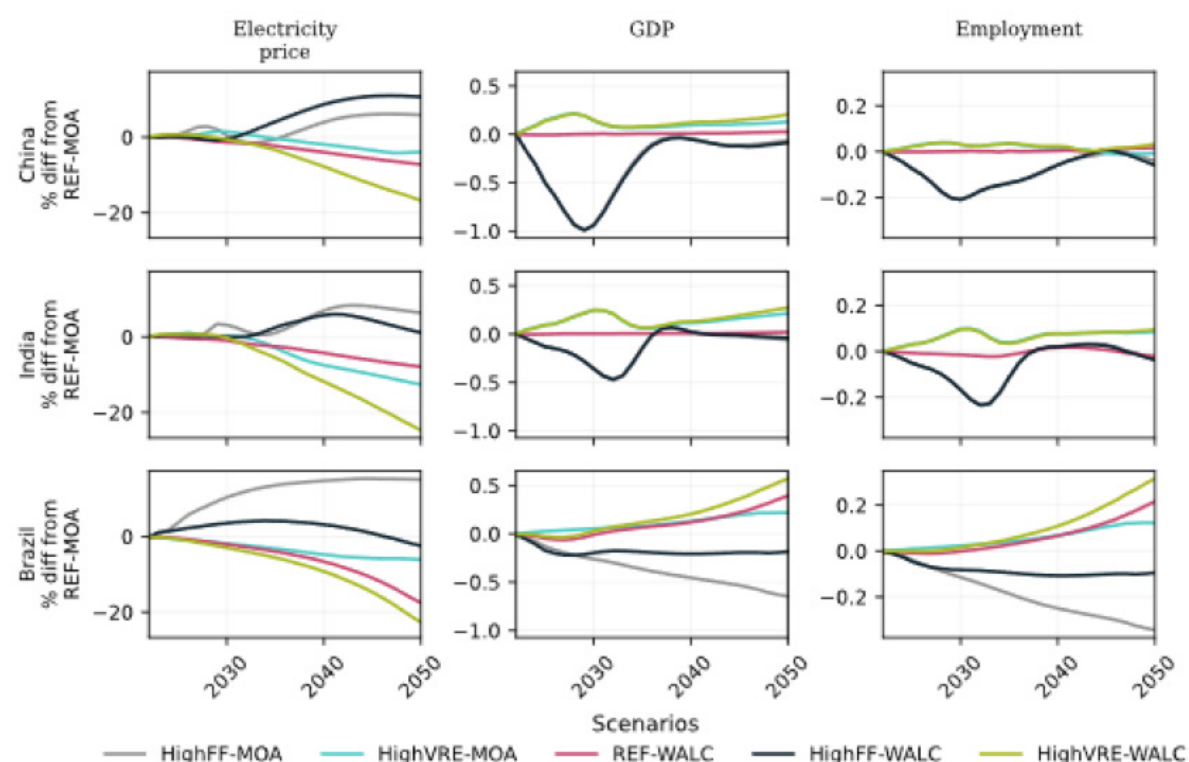
Preços da eletricidade

O cenário e o desenho do mercado desempenham um papel importante no preço da eletricidade. A Figura 20 mostra os preços da eletricidade nos vários cenários. Eles são mais baixos nos cenários HighVRE em comparação com as contrapartes HighFF, independentemente do desenho do mercado. Isso se deve aos preços mais baixos das energias renováveis e do armazenamento em comparação com os combustíveis fósseis.

O mecanismo de preço também desempenha um papel, com o WALC superando o MOA. O mecanismo de preço MOA normalmente leva a um preço de eletricidade mais alto, pois depende de custos marginais para combustíveis fósseis e pode levar a grandes lucros para energia nuclear e VRE quando os preços marginais dos combustíveis fósseis são altos.

É interessante comparar os cenários REF-WALC e HighVRE - MOA. Ambos mostram preços de eletricidade reduzidos, mas por razões diferentes. O mecanismo de preço WALC precisa baixar os preços porque o preço não é mais determinado pelos custos marginais dos combustíveis fósseis, e o cenário HighVRE mostra preços mais baixos devido ao fato de que as renováveis variáveis são mais baratas. Somente na Índia o HighVRE -MOA supera o REF-WALC. Até 2050, a Índia mostra a maior parcela de energia solar fotovoltaica em seu sistema entre os países analisados, o que significa que haverá um número substancial de horas no ano em que os custos marginais das VREs determinam o preço, em vez dos custos marginais dos combustíveis fósseis. Esse efeito não está presente na China e no Brasil, onde o mecanismo de precificação alternativo supera o aumento da aceitação do VRE.

Figura 20: Comparação dos preços da eletricidade, emprego total e PIB de cada cenário em diferença percentual com o cenário REF-MOA na China (linha superior), Índia (linha do meio) e Brasil (linha inferior).



Efeitos macroeconômicos

As alterações nos preços da eletricidade têm efeitos indiretos no resto da economia. Os preços mais baixos da eletricidade reduzem as contas de energia, o que desbloqueia os gastos do consumidor. Os custos de produção também são reduzidos, novamente ajudando a aumentar os gastos do consumidor.

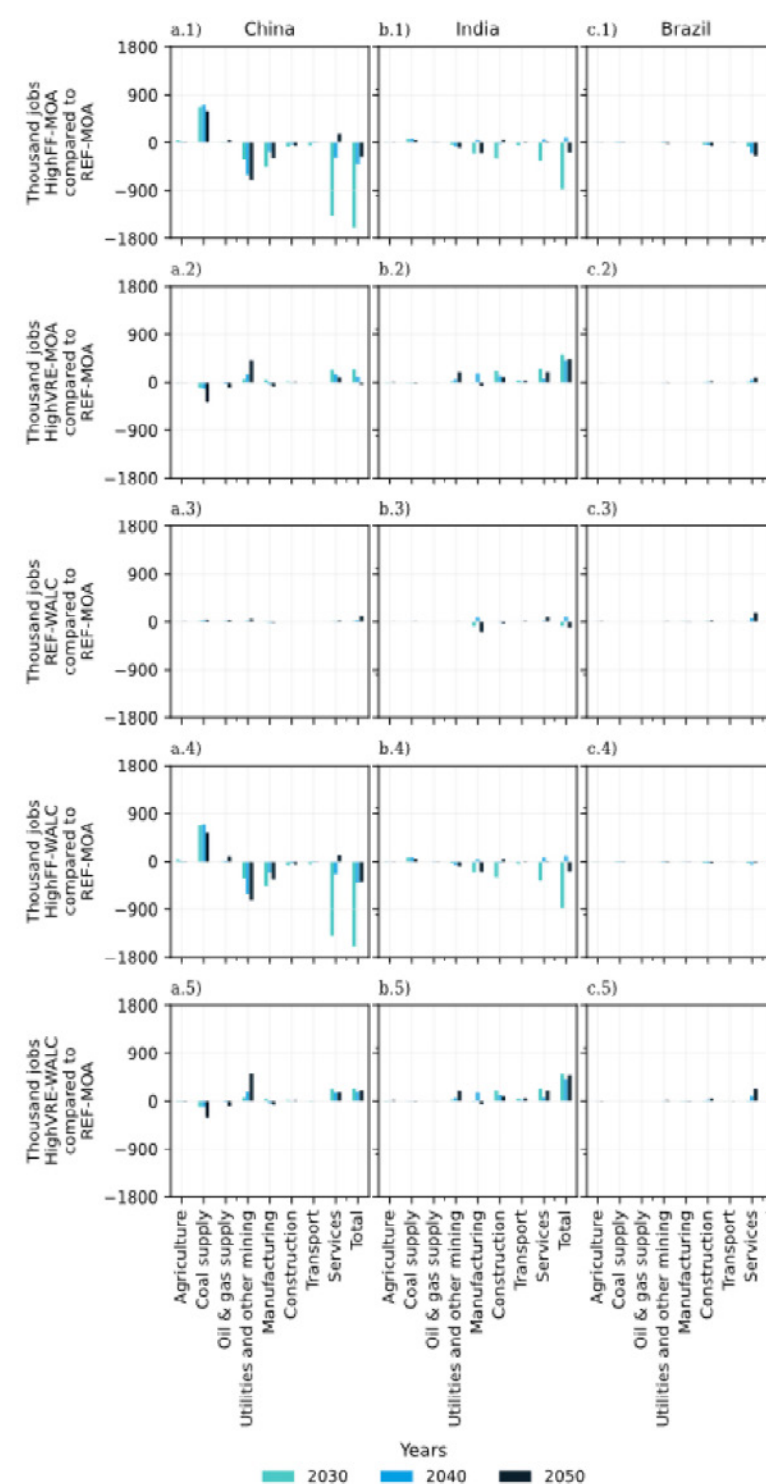
A maioria dos cenários de alto consumo de combustível fóssil mostra resultados do PIB ligeiramente negativos em comparação ao cenário de referência, porque os altos preços da eletricidade e os altos custos da

produção industrial restringem o consumo em muitos setores da economia. O impacto da alta dependência de combustíveis fósseis é especialmente negativo para o Brasil por volta da década de 2050, pois significa que ele deve importar mais recursos energéticos. Na Índia e na China, as perdas do PIB ocorrem mais cedo devido ao enfraquecimento do setor de construção em função da menor adoção de VREs. Há um efeito positivo no PIB nos cenários de alta energia renovável, e isso é maior em todos os três países quando a ampla adoção de energia renovável é combinada com o desenho de mercado WALC.

O efeito sobre o emprego é semelhante. Nos cenários HighVRE e no desenho do mercado WALC, vemos aumento do emprego em muitos setores e ganhos líquidos em geral. Os ganhos de emprego são maiores no cenário de fontes renováveis de alta variável e no desenho de mercado WALC. Há ganhos líquidos significativos de empregos nos cenários HighVRE na Índia e no Brasil, mas na China o resultado está no mesmo nível do cenário de referência. Isso ocorre

porque os ganhos de empregos na indústria de energias renováveis são compensados pelas perdas de empregos na indústria de extração doméstica. Por outro lado, os resultados do emprego são negativos para cenários com preços de eletricidade mais altos, particularmente os cenários de alta de combustíveis fósseis. Nesses cenários, os preços mais altos da eletricidade enfraquecem a demanda por serviços na Índia e na China e levam à redução do emprego (Figura 21).

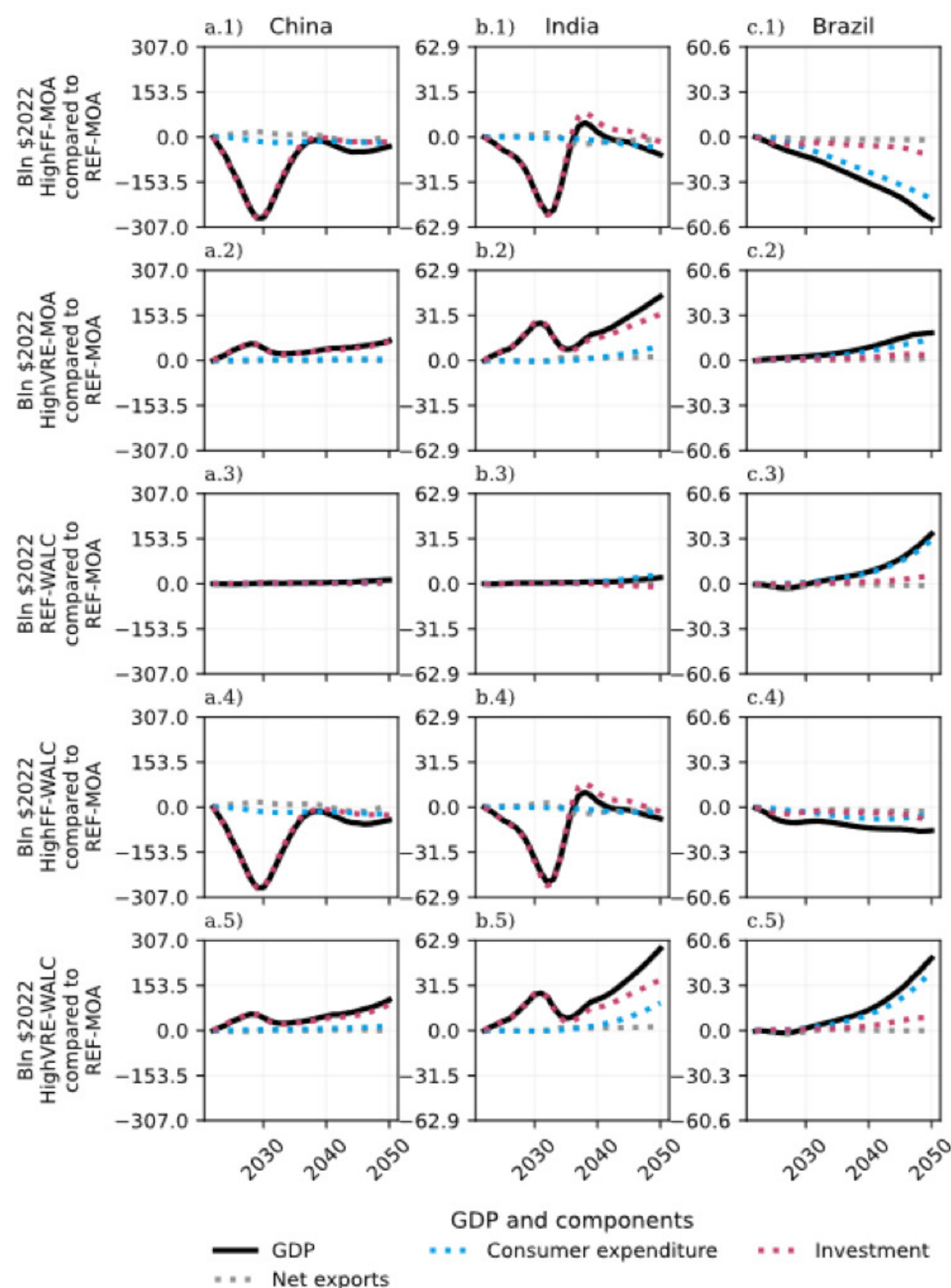
Figura 21: Impactos setoriais de empregos em comparação com o cenário REF-MOA. As diferenças são em termos absolutos.



Ao rastrear os componentes do PIB (consulte a Figura 22), descobrimos que os resultados positivos nos cenários de HighVRE são impulsionados pelo investimento de capital em capacidade adicional de VRE. Os cenários HighFF mostram resultados do PIB iguais ou abaixo dos níveis do cenário de referência até 2050. Nesses cenários, os impactos

negativos ocorrem por meio do aumento das importações de energia e dos gastos de consumo deprimidos devido aos altos preços da eletricidade. A economia brasileira respondeu mais fortemente a uma mudança no mecanismo de precificação do que apenas a uma mudança na configuração do sistema de energia.

Figura 22: PIB e seus componentes comparados ao cenário REF-MOA. As diferenças são em termos absolutos.



Discussão e conclusão

As políticas de promoção da energia solar fotovoltaica e eólica no passado definiram de forma irreversível o cenário para a difusão que estamos observando hoje.⁹⁷ As simulações apresentadas acima se baseiam nessa história e, juntamente com um ciclo de *feedback* positivo conforme a lei de Wright – quanto mais uma tecnologia é adotada, mais seus custos diminuem – mostram uma continuação das tendências anteriores. É provável que a energia solar fotovoltaica supere qualquer outra tecnologia pelo valor de face.

A remoção de barreiras à adoção de energia solar fotovoltaica e eólica tornará os países menos dependentes de importações de energia ou de recursos domésticos de combustíveis fósseis. Ter menos importações melhora a balança comercial de energia, que é significativa no Brasil e na Índia. O uso de menos recursos domésticos vem com um declínio nas indústrias relacionadas, o que leva à perda de empregos nesse setor. Isso é notável no contexto chinês. No entanto, isso pode ser superado pela criação de empregos relacionados à instalação de energia solar fotovoltaica e à construção de turbinas eólicas. No geral, uma transição mais rápida para as tecnologias VRE leva a resultados econômicos positivos, devido à redução dos preços da eletricidade, maiores investimentos em tecnologias VRE, diminuição da dependência de importações de energia e aumento dos gastos do consumidor em setores com maior conteúdo doméstico. A não remoção das barreiras à aceitação das VRE provavelmente perpetuará a dependência da geração de energia movida a combustíveis fósseis. China, Índia e Brasil perdem as oportunidades que a contínua transição energética oferece, enquanto a China provavelmente retém empregos no setor de abastecimento de carvão.

Os dois mercados de preços são retratados de forma estilizada no modelo. Não incluímos uma perda potencial de flexibilidade que um mercado WALC possa acarretar. Além disso, também não representamos as variações diárias do preço marginal de produção de eletricidade em MOA. Em vez disso, estimamos o tempo em que uma tecnologia de combustível fóssil ou renovável define o preço dependendo da difusão da VRE. No entanto, a modelagem deve fornecer uma indicação de primeira ordem das vantagens. Nossa modelagem pode subestimar os obstáculos que os (próximos) futuros sistemas de energia na China, Índia e Brasil enfrentam. Ele retrata uma continuação das tendências atuais, mas é possível que algumas tendências sejam descontinuadas, de modo que os tempos de construção aumentem e o cenário HighFF seja um cenário de referência melhor.

Índia e China estão fazendo movimentos para liberalizar seus setores de energia. O afastamento dos contratos de longo prazo é um passo importante para garantir que os países não fiquem presos à infraestrutura de combustíveis fósseis. No entanto, eles podem usar o MOA encontrado em mercados liberalizados como exemplo. Esse desenho de mercado pode não ser à prova de futuro. Um mecanismo de preços amplamente alinhado com o WALC pode garantir que as energias renováveis sejam pagas de forma suficiente.

China, Índia e Brasil têm a ganhar com a redução da exposição às barreiras que as tecnologias VRE podem enfrentar. O suporte de políticas anteriores e atuais para essas tecnologias as tornou competitivas em termos de custo. O ponto focal para os formuladores de políticas deve ser minimizar tais barreiras e moldar um mercado adequado para sistemas de energia dominados por tecnologias VRE.

⁹⁷ Grubb, M. et al. (2021). The New Economics of Innovation and Transition: Evaluating Opportunities and Risks, EEIST report to COP26.

ESTUDO DE CASO:

Modelando o desenvolvimento setorial combinado de hidrogênio e amônia na Índia

ZAC CESARO (UNIVERSIDADE DE OXFORD), RASMUS BRAMSTOFT (TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK), MATTHEW IVES (UNIVERSITY OF OXFORD), RENÉ BAÑARES-ALCÁNTARA (UNIVERSIDADE DE OXFORD)

Questão de política: A construção de uma infraestrutura verde de hidrogênio e amônia na Índia pode facilitar a transição para uma rede de eletricidade de emissão líquida zero?

Região: Índia

Método: Modelo de sistema de energia tradicional estendido por complexidade.

Principais conclusões: A política atual incorre em custos que nos colocam no caminho de dissociar os setores emergentes de hidrogênio e amônia da rede de energia. Existem oportunidades para construir sistemas mais resilientes e de baixo custo se o desenho promover o acoplamento dos setores analisados.

Engajamento: Este estudo de caso foi apresentado várias vezes aos stakeholders indianos para feedback por meio da equipe do Projeto EEIST na Índia e outros fóruns e eventos de modelagem.

Resumo: Os autores usam um modelo de sistema de energia tradicional, estendido por meio de princípios de nova modelagem econômica e ROA, para considerar o potencial de acoplamento setorial de hidrogênio e amônia para contribuir com as metas de emissões líquidas zero da Índia.

Introdução

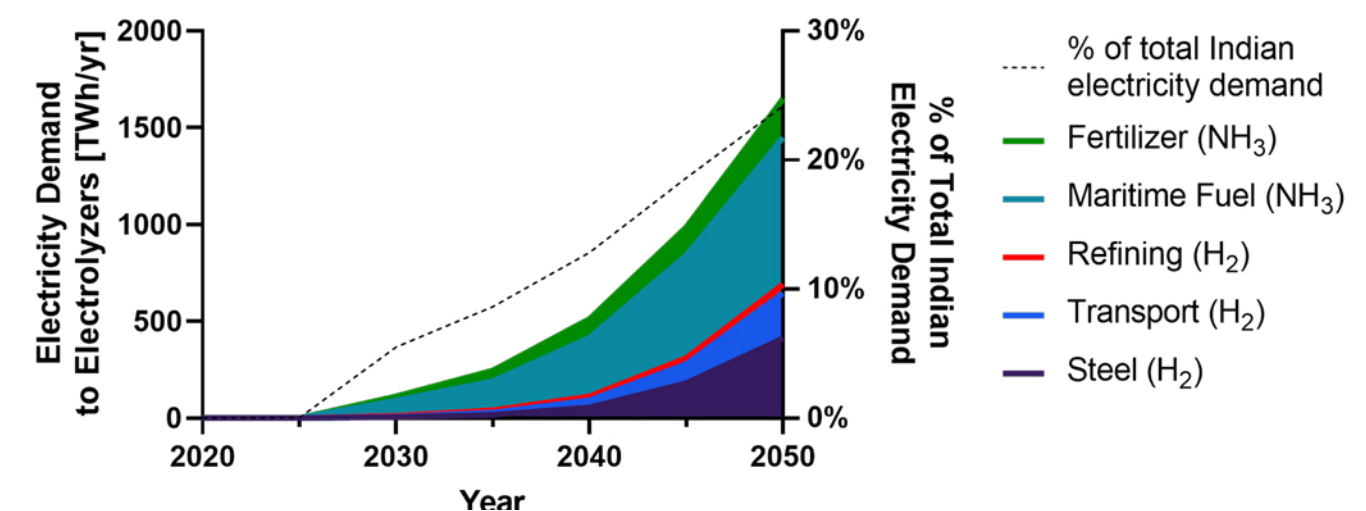
Em nível global, a Agência Internacional de Energia Renovável (International Renewable Energy Agency - IRENA) prevê que a produção de hidrogênio verde e seus derivados (principalmente amônia verde) será responsável por 30% da demanda global de eletricidade em 2050.⁹⁸ Ainda assim, análises publicadas usando modelos de sistemas de energia (*energy system models* - ESMs), a ferramenta dominante para entender diferentes cenários de descarbonização, têm sistematicamente negligenciado a integração dinâmica do acoplamento setorial de hidrogênio verde e amônia para demandas industriais, como aço e fertilizantes, e para combustível de transporte pesado, como transporte aéreo, aquaviário e rodoviário.

Simplesmente incluir demandas estáticas em modelos ESM não é suficiente; o futuro potencial para o acoplamento do setor é um dar e receber dinâmico. O hidrogênio verde e a amônia são úteis para retirar quantidades flexíveis de eletricidade da rede por meio de deslocamento de carga de curta e longa duração, bem como fornecer

eletricidade disponível de volta às redes por meio de reeletrificação, por exemplo, em turbinas a gás movidas a hidrogênio ou amônia. O foco principal na literatura ESM associada ao setor é o deslocamento de carga intradiário de curta duração, predominantemente no setor de transporte de veículos leves e no setor termelétrico, como o carregamento coordenado de frotas de veículos elétricos a bateria (*battery electric vehicle* - BEV).

Neste estudo, o potencial de acoplamento do setor via Power-to-X (PtX) envolvendo hidrogênio verde e amônia é explorado por meio de um estudo de caso abordando a rede elétrica nacional da Índia, na qual as demandas de eletricidade projetadas para produção de hidrogênio e amônia representam quase 25% da demanda total de eletricidade indiana em 2050 (Figura 23). A Índia foi escolhida como o estudo de caso devido ao crescimento incomparável da sua demanda em escala global, em todos os três setores relevantes: eletricidade verde, hidrogênio verde (para demandas de aço e transporte) e amônia verde (para demandas de fertilizantes e combustível para navios).

Figura 23: Demanda setorial de hidrogênio e amônia verde na Índia até 2050, incluindo comparação com a demanda final total de eletricidade.



⁹⁸ IRENA, Geopolitics of the Energy Transformation The Hydrogen Factor, Technical Report, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, 2022

Apesar da escala da frota de eletrolisadores necessária, não houve um esforço de modelagem, até onde sabemos, que considere o papel dinâmico da eletrificação industrial e do acoplamento setorial via PtX nessa escala na Índia. Há uma grande quantidade de trabalhos recentes que avaliam o papel da integração das VREs no sistema elétrico indiano.^{99 100 101 102 103 104 105 106 107} Muitos desses estudos baseados em modelos ESM analisam o desenvolvimento de novos ativos de geração, transmissão e armazenamento, bem como a melhor forma de utilizar os ativos existentes. No entanto, todos esses estudos ignoram o papel significativo do acoplamento setorial via PtX para facilitar a integração de altos níveis de adoção de VREs, reduzindo o custo da descarbonização e a necessidade de armazenamento de longa duração.

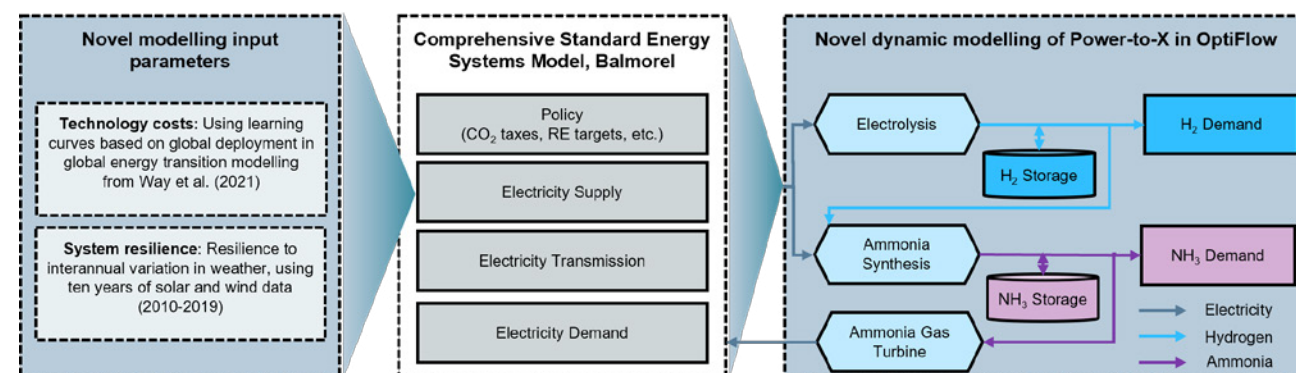
A Índia é pioneira na política focada em hidrogênio verde e amônia. O governo indiano anunciou uma meta de zero líquido até 2070,¹⁰⁸ bem como a Missão Nacional de Hidrogênio (*National Hydrogen Mission* - NHM) para acelerar a implantação de tecnologias de hidrogênio e estabelecer a Índia como um centro global de fabricação de eletrolisadores e células de combustível.¹⁰⁹ Como parte da NHM, existem obrigações envolvendo amônia verde no setor de fertilizantes que, se alcançadas, provavelmente levariam à produção nacional de amônia verde mais rápida do mundo. Mesmo que as metas não sejam atingidas, o impulso está crescendo, com grandes fábricas de amônia verde já anunciadas na Índia.¹¹⁰ No entanto, a política não se concentrou na integração da rede ou na interação dessas enormes novas demandas de eletricidade com a rede.

Resumo do modelo

Construímos um modelo ESM de última geração da rede elétrica da Índia até 2050 para explorar todo o potencial de acoplamento do setor de hidrogênio e amônia para contratar e fornecer serviços para a rede – ou seja, transferência de carga e geração de energia disponível. Os cenários de descarbonização aqui adotados são construídos a partir de outras pesquisas em nível setorial e concluem que até 2050 mais de 25% da eletricidade gerada na Índia será usada para produzir hidrogênio verde e amônia, conforme mostrado na Figura 23. Neste estudo, novos métodos metodológicos abordagens são adicionadas a um ESM de expansão de capacidade tradicional para capturar melhor as mudanças transformacionais de um sistema de energia (Figura 24).

A tecnologia PtX na Índia é um exemplo setorial de mudanças não marginais e transformacionais no sistema elétrico, tratando-se, portanto, de um bom caso de uso para EEIST. Alguns dos efeitos não marginais da tecnologia PtX no sistema incluem mudanças significativas no planejamento da eletricidade e na operação do sistema (o foco deste esforço de modelagem), mudanças no uso da terra e da água, mudanças geográficas e operacionais na mão de obra, redução significativa da energia importada e potencial significativo de energia exportada. Especificamente, três melhorias no ESM convencional estão incluídas neste esforço de modelagem: 1) uma integração dinâmica detalhada do acoplamento setorial via PtX e efeitos de rede (considerando produção, armazenamento,

Figura 24: Visão geral das melhorias no ESM padrão



transporte, uso industrial e geração de pico de energia); 2) previsões de custo de tecnologia empiricamente fundamentadas baseado em cenários globais de transição energética de Way et al;¹¹¹ e 3) representação da resiliência do sistema em face da variação climática interanual considerando a alta penetração das VREs. Essas três melhorias se alinham com as abordagens ROA de (i) modelagem de complexidade, (ii) ciclos de feedback positivo e (iii) resiliência do sistema à incerteza, respectivamente.

A modelagem é realizada usando o “Balmorel” ESM vinculado a um modelo Power-to-X em “OptiFlow”. O Balmorel foi escolhido por ser um ESM de código aberto amplamente utilizado para planejamento de capacidade e modelagem da disponibilidade de operação. É um modelo que vem sendo desenvolvido nas últimas duas décadas para subsidiar análises do setor de energia com ênfase em eletricidade e sistemas combinados de calor e potência.¹¹² O modelo básico foi escrito pela primeira vez para países bálticos/nórdicos e agora é usado em todo o mundo. Por exemplo, Balmorel é usado pelo Chinese Energy Research Institute (ERI), membro do consórcio do Projeto EEIST, para modelar a transição energética na China em seu relatório anual China Renewable Energy Outlook.¹¹³

Como um modelo técnico-econômico, ele fornece a funcionalidade para conduzir o planejamento de energia para o setor de energia e calor. O modelo é escrito em *General Algebraic Modeling System* (GAMS), uma linguagem de modelagem algébrica e software usado para resolver problemas de otimização lineares, não lineares e inteiros mistos. Em sua configuração básica, o modelo Balmorel otimiza o investimento em geração e transmissão linearmente usando simulação da disponibilidade horária e desenvolvimento de cenários plurianuais. Essencialmente, ele encontra a solução econômica de disponibilidade e de expansão de capacidade de menor custo para o sistema de energia representado, sujeito às premissas e restrições técnicas e econômicas fornecidas.

O OptiFlow¹¹⁴ é um modelo de otimização de rede espaço-temporal de código aberto que pode ser vinculado ao Balmorel. O OptiFlow usa relações do tipo nó-arco para representar fluxos como energia, massa, economia ou métricas ambientais. Nesta pesquisa, a produção, o armazenamento, o transporte e o uso de hidrogênio verde e amônia são modelados usando o OptiFlow vinculado ao Balmorel com base na configuração usada em outros trabalhos^{115 116} e conforme mostrado na Figura 24.

⁹⁹ Abhyankar, N. et al. (2021) Least-Cost Pathway for India's Power System Investments through 2030. Technical Report, Lawrence Berkeley National Laboratory.

¹⁰⁰ Palchak, D. et al. (2017) Greening the Grid: Pathways to Integrate 175 Gigawatts of Renewable Energy into India's Electric Grid. Vol. I – national study.

¹⁰¹ Palchak, D. et al. (2019). India 2030 Wind and Solar Integration Study: Interim Report, Technical Report NREL/TP-6A20-73854, National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73854.pdf>

¹⁰² Spencer, T. et al. (2020). Renewable Power Pathways: Modelling the Integration of Wind and Solar in India by 2030. TERI Discussion Paper. The Energy and Resources Institute. URL: <https://www.teriin.org/sites/default/files/2020-07/Renewable-Power-Pathways-Report.pdf>.

¹⁰³ CEA. (2020). Report on Optimal Generation Capacity Mix for 2029-30. Technical Report. Central Electricity Authority. URL: https://cea.nic.in/old/reports/others/planning/irp/Optimal_mix_report_2029-30_FINAL.pdf

¹⁰⁴ IEA. (2021). Renewables Integration in India, Technical Report. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-integration-in-india>.

¹⁰⁵ Chernyakhovskiy, I. et al. (2021). Energy Storage in South Asia: Understanding the Role of Grid-Connected Energy Storage in South Asia's Power Sector Transformation. Technical Report, National Renewable Energy Lab (US).

¹⁰⁶ IEA. (2021). India Energy Outlook 2021. Technical Report, International Energy Agency. doi:10.1787/ec2fd78d-en.

¹⁰⁷ Lu, T. et al. (2020). India's Potential for Integrating Solar and On and Offshore Wind Power into its Energy System. Nature communications 11 (2020) 1-10.

¹⁰⁸ Indian Ministry of External Affairs (2021) National Statement by Prime Minister Shri Narendra Modi at COP26 Summit in Glasgow.

¹⁰⁹ Ministry of New and Renewable Energy, Budget 2021-22 augments Capital of SECI and IREDA to promote development of RE sector. National Hydrogen Mission proposed, 2021.

¹¹⁰ Pekic, Sanja. (2022). 'India's Aavaada to Set up Green Ammonia Facility in Rajasthan'. Offshore Energy, 29 Aug. 2022, <https://www.offshore-energy.biz/indias-avaada-to-set-up-green-ammonia-facility-in-rajasthan/>.

¹¹¹ Way, R. et al. (2021). Empirically Grounded Technology Forecasts and the Energy Transition, Technical Report INET Oxford Working Paper No. 2021-01, Oxford Institute of New Economic Thinking (INET), 2021. URL: https://www.inet.ox.ac.uk/files/energy_transition_paper-INET-working-paper.pdf.

¹¹² Wiese, F. et al. (2018). Balmorel Open Source Energy System Model. Energy Strategy Reviews 20: 26-34. ISSN: 2211-467X. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X18300038>

¹¹³ Energy Research Institute of Academy of Macroeconomic Research/NDRC, China National Renewable Energy Centre. Ea Energy Analyses and the Danish Energy Agency (2020). China Renewable Energy Outlook 2020 tech. rep. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/creo_2020_executive_summary.pdf

¹¹⁴ Ravn, H. (2017). The OptiFlow Model Structure Technical. <http://www.balmorel.com/images/downloads/optiflowdocumentation20170909.pdf> (2021).

¹¹⁵ Lester, M.S et al. (2020). Analysis on Electrofuels in Future Energy Systems: A 2050 Case Study. Energy 199: 117408.

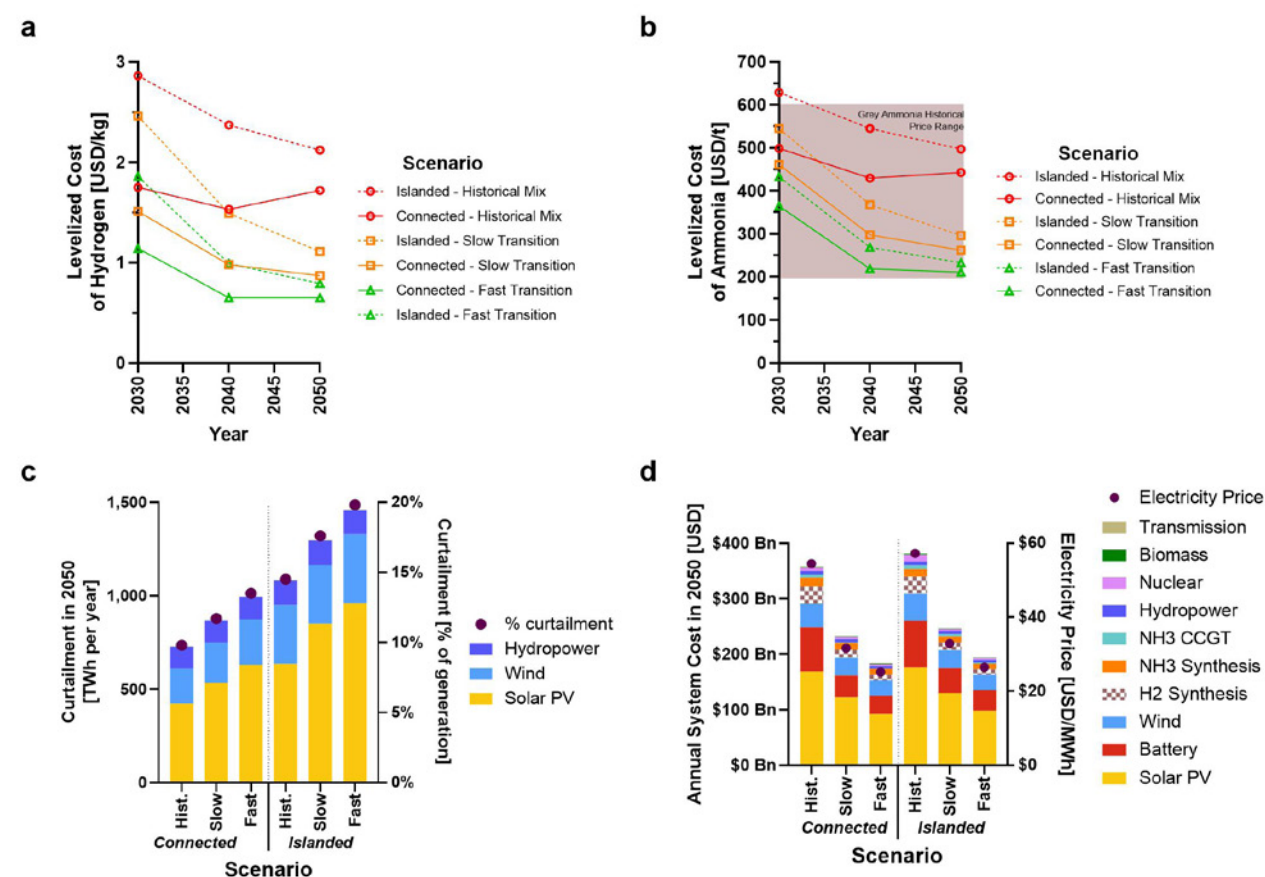
¹¹⁶ Bramstoft, R. et al. (2020). Modelling of Renewable Gas and Renewable Liquid Fuels in Future Integrated Energy Systems. Applied Energy 268: 114869.

Resultados

Um importante achado deste estudo é que há benefícios significativos em conectar a produção de hidrogênio e amônia à rede elétrica, em vez de ter locais de produção isolados. As usinas isoladas, que são independentes da rede e têm suas próprias energias renováveis dedicadas, representam a norma e a trajetória atuais da indústria, o que exigiria intervenção política para mudar. A integração da rede reduz o custo nivelado de hidrogênio (LCOH) e amônia (LCOA) em 10-

25% nos cenários modelados (Figura 25a, 25b). A redução em LCOH e LCOA é impulsionada por preços mais baixos de eletricidade disponíveis para eletrolisadores conectados à rede, porque eles obtêm acesso à eletricidade que, de outra forma, seria reduzida. Nos cenários de produção isolada, 15-20% da eletricidade gerada na Índia em 2050 é reduzida, enquanto apenas de 10-14% é reduzida nos cenários conectados à rede (Figura 25c). Em termos absolutos, isso evita que 350 a 460 TWh de eletricidade sejam reduzidos e 200-300 GW a menos de PV e eólica precisam ser instalados até 2050.

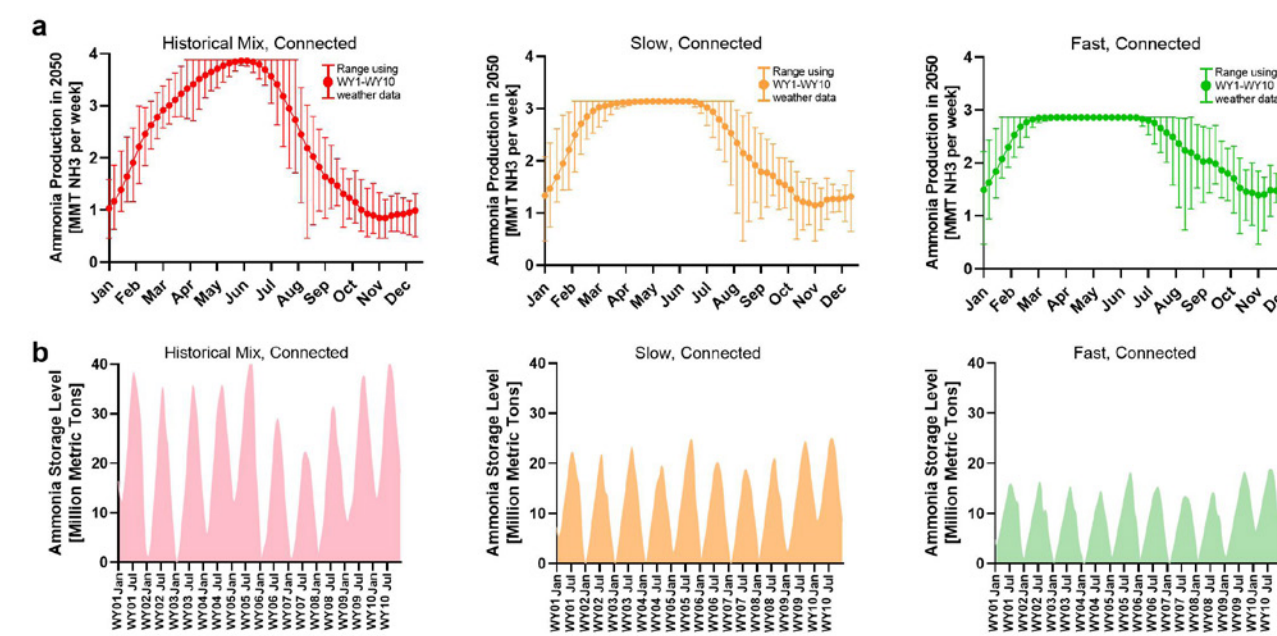
Figura 25: Principais métricas de resultados em cenários de sistemas conectados à rede e isolados. a) LCOH em cenários de 2030-2050. b) LCOA em cenários de 2030-2050 com preço histórico de commodities de amônia cinza (Mar Negro). c) Redução entre cenários em 2050. d) Custos de sistema anualizados entre cenários em 2050.



Além disso, conectar grandes frotas de eletrolisadores à infraestrutura da rede e transferir a carga da produção industrial – especificamente a produção de amônia verde para fertilizantes e combustível para transporte marítimo – é uma estratégia plausível para uma rede elétrica de baixo custo, mais eficiente e confiável. Esse sistema de menor custo previsto produz hidrogênio verde e amônia em um padrão sazonal para corresponder ao excedente renovável. O excesso de amônia verde é armazenado em silos localizados acima do solo

de baixo custo e depois consumido nas estações de menor produção de hidrogênio verde e amônia para atender às demandas constantes nos setores de fertilizantes e transporte marítimo, bem como para fornecer capacidade de geração firme. Quantidades menores de hidrogênio verde são armazenadas para deslocamento de carga intradiário. Essa configuração de acoplamento setor via sistema PtX não é apenas de custo mais baixo, mas também mais resistente a anos climáticos de VRE desfavoráveis, conforme mostrado em 10 anos de dados climáticos.

Figura 26: Variação sazonal e interanual na produção de amônia e nos níveis de armazenamento para atender a uma demanda constante. a) Produção semanal de amônia em todo o país em 2050 em cenários conectados, mostrando a faixa de produção semanal de amônia dependendo do ano de dados solares e eólicos. b) Níveis de armazenamento de amônia em todo o país em 2050 ao longo de 10 anos climáticos (WY1-WY10) de dados solares e eólicos em simulação, correspondentes a 2010-2019.



Em resumo, os resultados destacaram os custos da atual “sabedoria convencional” e das decisões políticas, que estão no caminho de desacoplar os setores emergentes de hidrogênio e amônia da rede; apontaram também as oportunidades para construir sistemas mais resilientes e de baixo custo se desenhados por meio do acoplamento dos

setores em análise. Essencialmente, esse sistema mais resiliente e de baixo custo depende de um novo paradigma industrial de síntese flexível de amônia com armazenamento significativo de amônia e do mercado certo e de medidas políticas para possibilitar esse comportamento industrial.

Relevância da política

Infelizmente, os benefícios potenciais desse projeto de sistema não serão percebidos a menos que a política afaste as relações indústria-rede de sua história. Para a indústria, a conexão à rede é frequentemente associada a altas taxas de conexão e falta de confiabilidade, o que garante *backup* de energia no local e usinas de energia “cativas” completas em cenários extremos. Essa dependência da trajetória histórica é extremamente evidente na Índia, onde usinas de energia cativas em usuários comerciais e industriais representaram 17% da geração do país em 2019-20, com mais de 78 GW de geração de energia cativa instalada.¹¹⁷ Essas usinas de energia cativas são parcial ou totalmente desconectadas das redes de distribuição e transmissão para evitar as tarifas historicamente caras e de baixo desempenho cobradas dos usuários industriais.

Como está hoje, as frotas de eletrolisadores para a indústria provavelmente seguiriam os mesmos passos, com sistemas isolados evitando cobranças de conexão à rede e outras desvantagens reais ou percebidas. No entanto, nossos resultados apontam que a política deve orientar o sistema em direção a um novo paradigma de relações indústria-rede que beneficiem sinergicamente ambas as partes na transformação para uma economia de emissão zero. Políticas recentes anunciadas como parte do NHM da Índia são um passo para conectar à rede PtX. A política deve buscar reduzir os custos da rede para usinas verdes de hidrogênio e amônia, isentando-se de tarifas de transmissão interestadual, entre outros incentivos.¹¹⁸ A adequação dessas políticas e de outros mecanismos de políticas e de mercado precisa ser explorada hoje, no início dessa transformação, a fim de avançar para um cenário futuro mais integrado.

Nossos resultados também informam a política em dois pontos. Em primeiro lugar, apoiam a ideia de que hidrogênio e amônia verdes podem melhorar drasticamente a segurança energética e reduzir as importações. A NHM da Índia declara explicitamente: “A implementação desta política fornecerá combustível limpo para as pessoas comuns do país. Isso reduzirá a dependência de combustíveis fósseis e também reduzirá as importações de petróleo bruto”.¹¹⁹ De fato, os níveis de LCOH e LCOA alcançados são mais competitivos do que a importação de combustíveis fósseis para os setores siderúrgico e de fertilizantes

na Índia. Em fertilizantes, a Índia atualmente depende 80% das importações para a produção de amônia: 25-30% do consumo de fertilizantes do país é amônia importada (custando mais de US\$ 1,3 bilhão por ano) e mais de 60% da produção doméstica a amônia produzida é produzida com GNL importado usado.¹²⁰ Essa dependência de importações é uma das principais razões estratégicas para a Índia mudar para a produção doméstica de amônia verde para fertilizantes e os resultados deste estudo sugerem que isso é possível no curto prazo sem subsídios ou mecanismos de precificação de CO₂.

Em segundo lugar, nossos achados apontam o potencial da Índia de usar a capacidade excedente de VRE em terras áridas para produzir combustíveis para exportação, como combustível de abastecimento. Mais uma vez, a NHM da Índia declara explicitamente: “O objetivo também é que nosso país emergja como um centro de exportação de hidrogênio verde e amônia verde”.¹²¹ As evidências sugerem que a Índia pode, de fato, produzir amônia de baixo custo suficiente a partir dos recursos VRE (usando suposições de categorização de uso de terras estéreis e residuais) para, por exemplo, atender facilmente à demanda de mais de 10% da demanda global de combustível marítimo até 2050 previsto pelo Banco Mundial.¹²²

Além da Índia, o papel potencial da mudança de carga em hidrogênio verde e amônia precisa ser modelado para outros países e regiões, que terão uma incompatibilidade única de oferta e demanda de VRE local, bem como demandas de PtX específicas do país.

O valor real de modelos como o que apresentamos aqui não são os resultados precisos de um ESM olhando para 2050, mas sim para destacar alavancagem ou pontos de intervenção sensíveis¹²³ e bases para desenhos de sistemas que alteram drasticamente o estado final da transformação do sistema. Descobrimos que o hidrogênio e a amônia podem ser uma alavanca para mudar nossas redes elétricas para melhor, se estiverem totalmente integrados. Esperamos que a análise apresentada aqui motive e acelere a comunidade acadêmica mais ampla a expandir os modelos ESM para várias regiões e suposições para considerar os impactos potenciais do PtX a partir do acoplamento setorial.

¹¹⁷ Central Electricity Authority. (2020). Growth of Electricity Sector in India from 1947-2020. Technical Report. URL: https://cea.nic.in/wp-content/uploads/pdm/2020/12/growth_2020.pdf

¹¹⁸ Ministry of Power. (2022). Ministry of Power Notifies Green Hydrogen/Green Ammonia Policy. URL: <https://pib.gov.in/pib.gov.in/Pressreleaseshare.aspx?PRID=1799067>

¹¹⁹ Ministry of Power. (2022). Ministry of Power Notifies Green Hydrogen/Green Ammonia Policy. URL: <https://pib.gov.in/pib.gov.in/Pressreleaseshare.aspx?PRID=1799067>

¹²⁰ IEA. (2021). India Energy Outlook 2021. Technical Report, International Energy Agency. doi:10.1787/ec2fd78d-en.

¹²¹ Ministry of Power. (2022). Ministry of Power Notifies Green Hydrogen/Green Ammonia Policy. URL: <https://pib.gov.in/pib.gov.in/Pressreleaseshare.aspx?PRID=1799067>

¹²² Englert, D. et al. (2021). The Potential of Zero-Carbon Bunker Fuels in Developing Countries. World Bank Technical Report. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35435>.

¹²³ Farmer, D. et al. (2019). Sensitive Intervention Points in the Post-Carbon Transition. Science 364: 132-134.



ESTUDO DE CASO:

Qual é a forma mais econômica de precificação de carbono? modelando o mercado de emissões e a taxação de carbono em geral e na China

SIMON SHARPE (CLIMATE CHAMPIONS TEAM; WORLD RESOURCE INSTITUTE), HUAIYU WANG (UNIVERSIDADE NORMAL DE PEQUIM), JIA LIU (BEIJING RENMU CONSULTANT COMPANY), TIANYI WU (UNIVERSIDADE NORMAL DE PEQUIM), ZHENG KANG (UNIVERSIDADE NORMAL DE PEQUIM), ZHANGANG HAN (UNIVERSIDADE NORMAL DE PEQUIM), ALED JONES (UNIVERSIDADE ANGLIA RUSKIN), DAVIDE NATALINI (UNIVERSIDADE ANGLIA RUSKIN), PETE BARBROOK-JOHNSON (UNIVERSIDADE DE OXFORD)

Questão de política: Qual é a forma mais econômica de precificação do carbono na China?

Região: China

Métodos: Um exercício qualitativo de mapeamento de sistemas e dois modelos quantitativos baseados em agentes.

Principais conclusões: Os mercados de emissões (*emission trade schemes* - ETS) precisam ser desenhados para evitar a introdução de *feedback* de equilíbrio nas emissões. Sem isso, a taxação sobre o carbono será mais econômica. A concorrência no setor de energia, ou mais precisamente, um sinal de preço claro, é a chave para permitir que as políticas de precificação do carbono funcionem.

Engajamento: Este estudo de caso surgiu de uma longa e estreita colaboração entre equipes de políticas e analistas na China, acadêmicos chineses e pesquisadores do Reino Unido. O tópico e a questão de política, bem como as partes da modelagem foram todos elaborados em estreita colaboração das equipes com os *stakeholders* políticos.

Resumo: Os autores usam um exercício qualitativo de mapeamento de sistemas, em combinação com dois modelos quantitativos validados baseados em agentes, para explorar a questão de quão eficazes podem ser diferentes opções de precificação de carbono na China. O exercício de mapeamento de sistemas mostra como um ETS pode introduzir um *feedback* equilibrado sobre as emissões, potencialmente retardando o progresso, e os modelos baseados em agentes complementam isso sugerindo que a taxação pode ser mais eficaz, ao mesmo tempo em que demonstra a importância da competição entre tecnologias de energia para a eficácia dessas políticas.

Introdução

A precificação do carbono tem sido frequentemente recomendada como a política mais eficiente para alcançar a descarbonização. Relatórios anteriores¹²⁴ do projeto EEIST questionaram se este é realmente o caminho, observando que essa recomendação deriva da suposição de equilíbrio que parece incompatível com o contexto de uma transição de baixo carbono e que considerar *feedbacks* na economia pode levar a conclusões diferentes. No entanto, a precificação do carbono está bastante disseminada: o Banco Mundial contabilizou 70 iniciativas de precificação do carbono implementadas em 2022, abrangendo 47 jurisdições nacionais e 36 jurisdições subnacionais.¹²⁵ Os governos, consequentemente, têm um grande interesse em entender qual forma de precificação do carbono tem maior probabilidade de ser eficaz e em quais situações. Como a precificação do carbono pode ser usada para conduzir uma transição de baixo carbono rápida e com baixo custo?

Essa continua sendo uma questão de política importante. A União Europeia está considerando expandir seu mercado de emissões, e novos ETSs estão sendo considerados na Índia e no Brasil. Na China, onde um ETS nacional começou em 2021, há um debate contínuo sobre seus impactos e os méritos de diferentes mecanismos de precificação e sua interação com outras políticas.

Embora existam muitas maneiras de atribuir um preço efetivo para o carbono, incluindo leilões, preços paralelos e outras regulações que introduzem preços indiretos, a maioria das políticas de precificação pode ser categorizada como um dos dois tipos: uma taxação sobre o carbono, no qual as emissões são tributadas a um taxa fixa (que pode ser constante, crescente ou decrescente); ou um esquema do tipo cap-and-trade, também conhecido como esquema de comércio de emissões (*emission trade schemes* - ETS) (usamos os termos de forma intercambiável aqui, mas usamos principalmente o último), no qual as empresas compram permissões de emissão negociadas em um mercado, cujo fornecimento está sujeito a um limite ou cap (que pode ser constante, ascendente ou descendente).

Tradicionalmente, os economistas argumentam que essas duas formas de precificação do carbono são fundamentalmente equivalentes. Espera-se que ambas incentivem as empresas a reduzir suas emissões até o ponto em que seus custos marginais de abatimento sejam iguais ao preço do carbono. Em uma primeira aproximação, espera-se que as duas abordagens sejam equivalentes em relação aos incentivos que criam para a redução de emissões e em relação aos custos totais de redução de emissões.¹²⁶ Em geral, as avaliações apontam que diferenças entre as duas abordagens surgirão dos detalhes de sua implementação. Uma questão de preferência também tem sido amplamente reconhecida: um imposto sobre o carbono é visto como fator que atribui certeza ao nível de preço do carbono, o que pode ser útil para as empresas, enquanto um mercado de emissões (ETS) é visto como gerando certeza sobre o nível de emissões, o que pode ser atraente para os formuladores de políticas.

Neste estudo de caso, abordamos a questão da forma mais econômica de precificação do carbono de uma perspectiva diferente. Como as transições de baixo carbono são um processo de mudança, não assumimos o equilíbrio. Em vez disso, usamos ferramentas analíticas que consideram a dinâmica da economia para entender o efeito provável de diferentes formas de precificação do carbono, individualmente e em combinação com outras políticas.

Este estudo de caso compreende três partes. A Parte 1 usa o mapeamento de sistemas para estabelecer uma compreensão básica da dinâmica da economia que pode ser criada ou influenciada por diferentes abordagens de precificação de carbono. A Parte 2 usa um modelo baseado em agente para explorar a eficácia de abordagens alternativas para a precificação do carbono em um setor de energia hipotético com um mercado competitivo para geração de eletricidade, como pode ser encontrado no Reino Unido ou na Europa. A Parte 3 usa um segundo modelo baseado em agente para considerar a eficácia das opções de política de precificação de carbono na China. Damos conclusões para a política no final de cada parte.

¹²⁴ <https://eeist.co.uk/eeist-reports/>

¹²⁵ <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>

¹²⁶ Stavins, R. (2019). The Future of U.S. Carbon-Pricing Policy. M-RCBG Faculty Working Paper Series, No. 2019-02. Disponível em: <https://www.hks.harvard.edu/centers/mrcbg/publications/fwp/2019-02>

Parte 1: Mapeamento de sistemas de opções de precificação de carbono

O que é mapeamento de sistemas?

O mapeamento de sistemas refere-se a um conjunto de métodos desenhados para descrever sistemas, ou certos aspectos de sistemas, por meio de diagramas e modelos.¹²⁷ Existem métodos qualitativos de mapeamento de sistemas, como Rich Pictures ou diagramas da Teoria da Mudança, e métodos quantitativos (que podem incluir uma abordagem de simulação), como redes bayesianas ou dinâmica de sistemas. Muitos métodos de mapeamento de sistemas, mas não todos, enfocam a causa e a influência nos sistemas, tentando descrever relações causais. Métodos que focam em causa e influência tendem a usar uma rede de nós e arestas para representar a influência entre variáveis ou fatores.

Neste estudo de caso, usamos uma abordagem de mapeamento de sistemas chamada “diagramas de loop causal”. O método pode ser usado por pesquisadores individuais, ou construído conjuntamente com stakeholders, para produzir mapas que são organizados em torno de *feedbacks* centrais, às vezes chamados de “mecanismos de sistema”. Estes vêm em dois tipos: *feedbacks* de reforço, nos quais um aumento em uma variável leva a um novo aumento na mesma variável, tendendo a amplificar o impacto ou acelerar a mudança; e *feedbacks* de equilíbrio, nos quais o aumento de uma variável leva a uma diminuição da mesma variável, tendendo a limitar a mudança ou preservar a estabilidade.

Às vezes, os diagramas de loop causal são o primeiro passo na construção de um modelo de simulação de dinâmica de sistemas, mas nem sempre. Às vezes, gráficos de “comportamento ao longo do tempo” (*behaviour-over-time* - BOT) são produzidos para diagramas de loop causal que tentam descrever o comportamento esperado dos *feedbacks* ao longo do tempo. Embora pareçam gráficos quantitativos, eles se baseiam puramente em nossa expectativa qualitativa sobre como os *feedbacks* interagem e não são resultados de nenhuma análise quantitativa.

Como construímos esses mapas de sistemas?

Para comparar a eficácia dinâmica das opções de política de precificação de carbono, realizamos um exercício de mapeamento e pensamento sistêmico usando o método desenvolvido por Meadows (2008).¹²⁸

O foco desse exercício foi usar o mapeamento de sistemas para identificar *feedbacks* no sistema econômico de interesse – o setor de energia, suas tecnologias e as políticas de precificação de carbono – que ajudariam ou impediriam uma descarbonização rápida e econômica.

Os mapas são baseados em uma combinação de revisões de literatura, opinião de especialistas e discussão com *stakeholders*. Eles são mantidos intencionalmente simples, para focar nos *feedbacks* no centro deste sistema, em vez de trazer muitas informações mais amplas. Eles não são formalmente validados, mas quase todos os relacionamentos neles são logicamente verdadeiros (por exemplo, se o custo de uma tecnologia cair, seu custo relativo para os concorrentes também deve diminuir) e o restante é apoiado por conceitos bem estabelecidos (por exemplo, a adoção da tecnologia tende a reduzir seu preço – lei de Wright).

Mapas do sistema de diferentes mecanismos de precificação de carbono

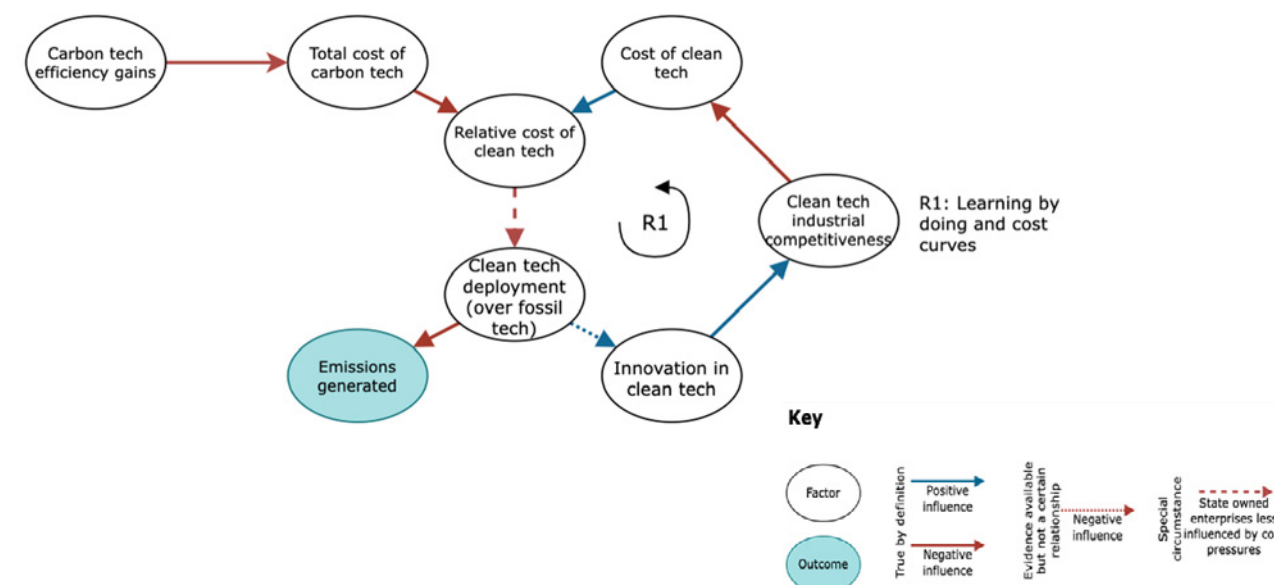
Desenvolvemos mapas de sistema de cinco cenários de política de precificação de carbono: (i) sem intervenção, (ii) imposto sobre carbono, (iii) ETS, (iv) padrão de portfólio renovável e (v) combinações desses instrumentos. Descrevemos aqui apenas os três primeiros.

Nenhuma intervenção política e aprender fazendo

O mapa do sistema “sem intervenção” (Figura 27) serve para enfatizar o poderoso *feedback* criado pelo “aprender fazendo” descrito pela lei de Wright, segundo a qual a adoção de uma tecnologia tende a gerar aprendizado e inovação nessa tecnologia, o que diminui custos. Isso, por sua vez, torna a tecnologia relativamente mais barata e, portanto, aumenta a probabilidade de adoção futura. Esse é um *feedback* de reforço bem documentado que impulsiona a implantação de tecnologias limpas e reduz as emissões.¹²⁹

Além desse *feedback*, o mapa “sem intervenção” também mostra o efeito de outra política: a pressão por maior eficiência nas tecnologias de combustíveis fósseis. Isso pode reduzir as emissões de usinas movidas a combustíveis fósseis; no entanto, também pode reduzir o custo total da eletricidade dessas tecnologias, tornando-as mais competitivas em comparação com as tecnologias limpas. Isso poderia enfraquecer o *feedback* de reforço da implantação de tecnologia limpa e redução de custos, a menos que seja contrariado por outras políticas.

Figura 27: Nenhuma intervenção – trajetória de adoção da tecnologia limpa aumentou o aprendizado prático e reduziu os custos, incentivando assim mais adoção, que por sua vez apoia ainda mais o aprendizado prático em um *feedback* de reforço (R1). Nota: a influência positiva e negativa refere-se a uma relação matemática, não a uma relação normativa (ou seja, positiva significa que vão na mesma direção, para cima ou para baixo juntos, não que a influência seja boa ou desejável).

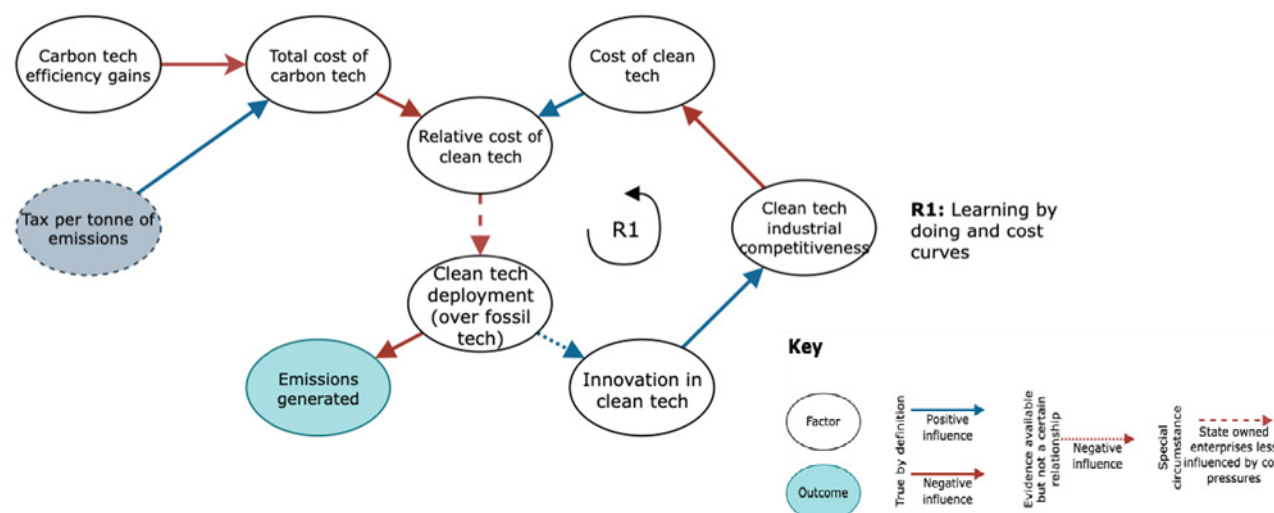


Taxação do carbono

A Figura 28 apresenta o primeiro mapa com uma intervenção de política de precificação de carbono: um imposto sobre o carbono. Aqui, vemos o mesmo *feedback* de reforço sobre aprender fazendo, com a adição de um fator de política que afeta diretamente o custo das tecnologias de carbono. Podemos ver claramente que adicionar um imposto de carbono fortalece o ciclo de *feedback* de reforço existente sem criar nenhuma outra influência. Esperamos que isso acelere o processo de adoção de tecnologias limpas e redução de custos, tudo o mais sendo igual.

Nesse exemplo, não há utilização da receita gerada pelo imposto. No entanto, se quiséssemos incluir a reciclagem da receita da taxa de carbono, isso poderia ser feito adicionando um fator de receita com base nas emissões geradas e, em seguida, girando essa rodada para o custo de tecnologias limpas (representando um subsídio para adoção) ou para inovação em tecnologia limpa (representando investimento em P&D). Em ambos os casos, isso fortaleceria ainda mais o *feedback* de reforço da adoção de tecnologia limpa e redução de custos – seja reduzindo o custo relativo de tecnologias limpas ou aumentando a inovação de tecnologia limpa.

Figura 28: Taxação sobre o carbono – o imposto aumenta o custo da tecnologia do carbono, reduzindo o custo relativo da tecnologia limpa, apoiando ainda mais o *feedback* de reforço do aprender fazendo (R1).



¹²⁷ Barbrook-Johnson, P. and Penn, A. (2022) Systems Mapping: How to Build and Use Causal Models of Systems. Palgrave.

¹²⁸ Meadows, D. (2008). Thinking in Systems: A primer. Chelsea Green, White River Junction.

¹²⁹ Way, R. et al. (2022). Empirically Grounded Technology Forecasts and the Energy Transition. Joule 6(9): 2057-2082. Observe que este trabalho também aparece neste relatório como um estudo de caso.

79

Parte 2: Simulação de opções de política de precificação de carbono usando um modelo baseado em agente em um mercado competitivo

Neste exercício, comparamos as mesmas duas opções de política – um imposto sobre carbono e ETS – usando um modelo ABM baseado em um trabalho anterior de Chappin.¹³⁰ Essa é uma abordagem diferente e complementar. No mapeamento de sistemas, a dinâmica do sistema é entendida mapeando-se as relações entre as variáveis – com base no raciocínio lógico ou em evidências subjacentes – e identificando *feedbacks*. Em um modelo ABM, a dinâmica do sistema é investigada simulando as interações entre os agentes econômicos, onde o comportamento de cada agente é conduzido por um conjunto de regras de tomada de decisão. A diferença entre esses métodos significa que eles podem fornecer uma referência cruzada útil quando aplicados ao mesmo problema de política.

Projeto do modelo baseado em agente

O ABM que apresentamos recria um mercado abstrato fechado de eletricidade composto por 10 empresas, que produzem eletricidade para um número não identificado de consumidores que são representados por uma linha de tendência de demanda. Toda a demanda de eletricidade é atendida pela oferta neste mercado, que pode ser imaginado como uma versão estilizada de um país isolado ou do mundo inteiro (ou seja, não há comércio fora do mercado). As empresas podem usar quatro tecnologias para gerar eletricidade: carvão, gás natural, vento e energia solar fotovoltaica.

O modelo executa três cenários:

- 1) Sem intervenção, onde nenhuma política é implementada e as empresas continuam a produzir e investir ao longo de uma trajetória sem intervenção (*business as usual* – BAU)
- 2) O cenário ETS, que inclui uma política baseada no ETS da União Europeia (*European Union emission trade scheme* – EU ETS).
- 3) O cenário da tributação, onde se introduz um imposto sobre o carbono (e assume-se que o imposto é introduzido como uma taxa fixa e o mercado assume que essa taxa permanecerá durante os períodos de planejamento).

O modelo é fundamentado empiricamente apenas parcialmente, o que significa que parte dos dados alimentados no modelo, bem como os parâmetros usados, foram informados usando dados reais coletados da literatura disponível. Em particular, os parâmetros do modelo que definem os custos de diferentes tecnologias de geração de eletricidade e a taxa na qual esses custos de tecnologia caem em resposta à adoção foram retirados de Mercure (2012), e a taxa de redução do limite de emissões usado¹³¹ para simular o cenário ETS foi retirado do funcionamento real do EU ETS.¹³²

O modelo simula um mercado de eletricidade competitivo, onde a eletricidade das unidades de geração mais baratas é vendida primeiro e depois a eletricidade das unidades cada vez mais caras é vendida até o ponto em que a oferta atende à demanda. A demanda é definida de forma exógena e supõe-se que aumente 5% ao ano. Supõe-se que a demanda de eletricidade seja sempre atendida e, portanto, define o fornecimento de eletricidade. Qualquer excesso de capacidade de geração é deixado sem uso. O preço da eletricidade é definido pelo custo da unidade marginal de oferta. O custo de cada unidade de fornecimento é um custo nivelado de eletricidade que inclui custos de capital (depreciação), custos operacionais (combustível e manutenção) e quaisquer custos de precificação do carbono.

Os agentes em nosso modelo são as empresas de energia que tomam decisões sobre o quê, quando e quanto investir na implantação de novas tecnologias de geração de eletricidade. Cada empresa pode escolher entre as seguintes tecnologias de geração: carvão, gás, eólica e solar. Cada um começa com uma mistura diferente dessas tecnologias e tem diferentes expectativas sobre o futuro. Essas expectativas permitem que cada empresa projete tendências de um a sete anos no preço de mercado, custos de investimento e variáveis relacionadas à política (ou seja, preço de permissão ou imposto) para antecipar o lucro. Eles então decidem em qual tecnologia investir, com base em diferentes critérios que definem suas expectativas, incluindo atitude em relação à liderança de mercado (ser mais ou menos agressivo na tentativa de aumentar sua participação no mercado), expectativas em relação à tecnologia (ser mais ou menos partidário da visão de que o mercado favorecerá as energias renováveis e, portanto, seu custo diminuirá mais ou

menos rapidamente), preferência da empresa (se uma empresa vê as renováveis de forma mais favorável, o que pode ser devido, por exemplo, à sua própria experiência histórica ou à pressão dos investidores) e visão sobre a eficácia da política (o que uma empresa acredita sobre a rapidez com que o preço da permissão no esquema de comércio de emissões aumentará). Sugere-se ver Sharpe et al para mais detalhes.¹³³ Como as empresas visam maximizar seus lucros, suas decisões são em função dos retornos esperados e das restrições de capital.

O modelo pode ser executado com qualquer uma das duas configurações que regem a inovação. No cenário “exógeno”, o custo das tecnologias limpas diminui em função do tempo, seguindo uma relação da Lei de Moore baseada em dados históricos. Isso pode ser pensado como representando um mercado que é muito pequeno para influenciar os custos de tecnologia limpa de maneira significativa (uma simplificação; na realidade, fatores como custos de instalação e financiamento provavelmente serão influenciados pela política local, mesmo que os custos da tecnologia básica não sejam). No cenário “endógeno”, o custo das tecnologias limpas diminui em função de sua adoção cumulativa, seguindo uma relação da Lei de Wright baseada em dados históricos. Pode-se pensar que isso representa o mercado global, dentro de cujos limites ocorre toda inovação de tecnologia limpa.

O modelo é inicializado com uma lista de parâmetros cujos valores são baseados em suposições ou na literatura empírica. Em linha com as técnicas de desenvolvimento de modelos estabelecidas,

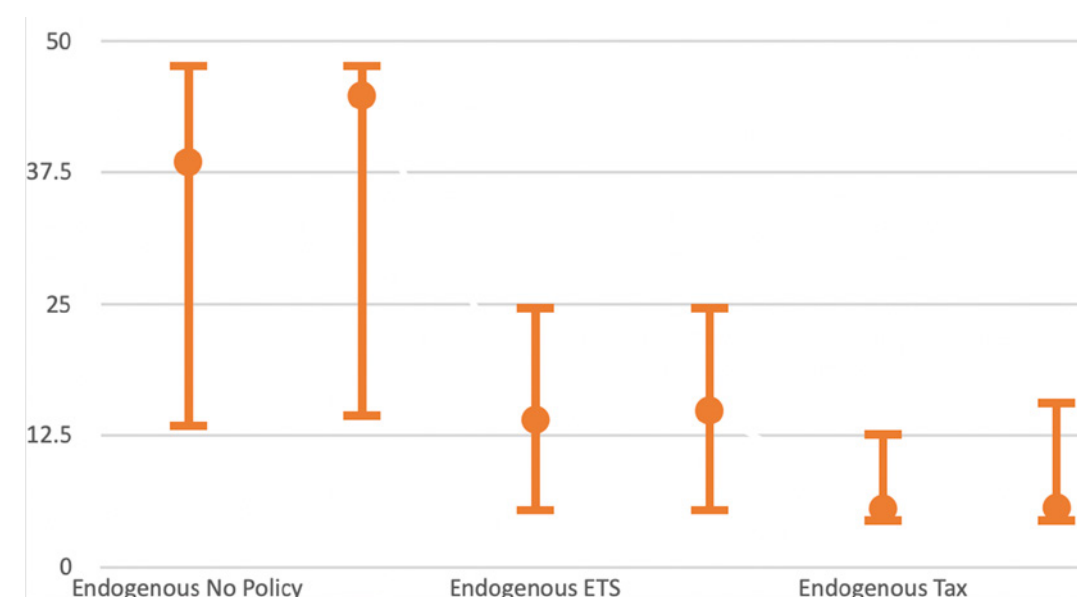
introduzimos aleatoriedade nos valores de inicialização para alguns parâmetros e variáveis, onde os seus valores não são completamente certos (especialmente quando se relacionam com respostas comportamentais), o que permite o aparecimento de comportamentos emergentes. Os resultados de muitas execuções podem então ser comparados para fornecer médias de conjunto, o que garante que os resultados não sejam conduzidos por escolhas específicas de variáveis. Além disso, usamos uma faixa de valores para algumas variáveis, onde as faixas típicas são conhecidas, para testar a sensibilidade das saídas a essas mudanças.

Resultados

Para nossas simulações, investigamos a eficácia de cada política na redução de emissões. Também comparamos isso com uma opção sem política. Executamos essa comparação sob as duas configurações de inovação do modelo: endógena e exógena. Para garantir uma comparação justa entre as duas políticas, o imposto de carbono é definido calculando-se o custo médio do carbono durante a simulação executada no ETS (portanto, o custo médio do carbono em cada simulação é idêntico). Por exemplo, se o preço médio (média) do carbono pago sob o esquema de comércio de emissões dentro do cenário endógeno for 68 euros/tonelada, então o imposto para o cenário endógeno é definido nesse nível.

As variáveis de saída de interesse são o tempo necessário para que as emissões cheguem a zero e as emissões totais durante a execução. A Figura 31 e a Tabela 9 resumem os resultados.

Figura 31: Tempo (mostrando min, max e média) para chegar a zero emissões nas simulações (em anos). As barras horizontais indicam o valor médio de vários modelos executados com cada cenário.



¹³⁰ Chappin, E. (2011). Simulating Energy Transitions. Next Generation Infrastructures Foundation, Delft, The Netherlands. Available online: <http://chappin.com/ChappinEJL-PhDthesis.pdf>

¹³¹ Mercure, J.-F. (2012). FTT:Power: A Global Model of the Power Sector with Induced Technological Change and Natural Resource Depletion. Energy Policy 48: 799-811. Nota: os valores foram convertidos de R\$ para £ para consistência para todas as quatro tecnologias (com base na taxa de câmbio de 2020). Devido à idade do papel (2012), os parâmetros relativos ao custo atual das renováveis estavam desatualizados. Portanto, estes foram cruzados com os valores atuais associados à posição da tendência nas curvas de custo.

¹³² EU. (2013). The EU Emissions Trading System (EU ETS). https://ec.europa.eu/clima/sites/default/files/factsheet_ets_en.pdf

¹³³ Sharpe, S. et al. (Forthcoming). Stuck in First Gear: Why Cap and Trade Causes Decarbonization at Maximum Cost.

Tabela 9: Emissões cumulativas (intervalo) antes de atingir emissões zero (em toneladas de CO2).

Cenário		Mín.	Médio	Significar	Máx.
Endógeno	Não-política	2.9 milhões	161 milhões	332 milhões	1.9 bilhão
	ETS	3.0 milhões	26.8 milhões	29.2 milhões	130 milhões
	Imposto	3.0 milhões	8.6 milhões	8.4 milhões	25.8 milhões
Exógeno	Não-política	3.0 milhões	213 milhões	413 milhões	1.9 bilhão
	ETS	3.1 milhões	28.1 milhões	30.2 milhões	138 milhões
	Imposto	3.1 milhões	8.6 milhões	8.5 milhões	26.3 milhões

Conforme ilustrado, o imposto tem um desempenho muito melhor do que o ETS na redução de emissões. Com o mesmo preço médio do carbono, o tempo médio para chegar a zero emissões é cerca de três vezes maior sob o ETS do que sob o imposto. As emissões cumulativas também foram cerca de três vezes maiores sob o ETS do que sob o imposto sobre o carbono. Essas proporções foram aproximadamente as mesmas sob configurações de inovação endógena e exógena, o que implica que a diferença de desempenho entre as duas políticas pode ser independente do tamanho do mercado.

Discussão

Essas descobertas parecem corroborar a principal conclusão do exercício de mapeamento de sistemas: que o imposto sobre o carbono é dinamicamente superior ao ETS. O desempenho do ETS é limitado por seu *feedback* de equilíbrio; o imposto, sem essa limitação, traz uma transição mais rápida.

Os resultados dos cenários apresentados neste modelo baseado em agente são conduzidos pela dinâmica da interação entre diferentes agentes que têm diferentes expectativas futuras de custos de tecnologia e (no cenário ETS) de preços das permissões. Dentro do modelo, há uma gama de expectativas futuras permitidas de custos de tecnologia renovável e preços de licenças futuras. (Como o imposto é fixo, todos os agentes têm a mesma – correta – expectativa para o preço do carbono no cenário tributário.) Nenhuma empresa tem previsão perfeita; então, embora em média suas expectativas possam ser consistentes com o que realmente acontece, individualmente suas expectativas irão divergir. Esses resultados dependem do grau de divergência nas expectativas dos agentes, com um *feedback* de reforço recompensando o investimento antecipado no cenário tributário e um *feedback* balanceador compensando esse efeito e retardando esse investimento no cenário ETS.

É importante observar que esses resultados estão sujeitos às ressalvas mencionadas no final da parte 1 deste estudo de caso: a força da política, as modificações da política e o desenho do mercado afetarão a eficácia relativa de um imposto sobre o

carbono ou de um ETS. Neste estudo, não assumimos nenhuma adaptação da política durante o tempo de vida das políticas, pois isso permite uma comparação clara entre as alternativas. Na realidade, é claro que as modificações nas políticas podem ser feitas durante a implementação de uma política, bem como durante o desenho da política.

Parte 3: Simulação de opções de política de precificação de carbono no setor de energia chinês usando um modelo baseado em agente

Nesta parte final do estudo de caso, desenvolvemos um modelo baseado em agente para comparar as opções de política de precificação de carbono na China, onde a estrutura do mercado de eletricidade difere significativamente do mercado competitivo simulado pelo modelo usado na Parte 2.

Contexto e história da precificação do carbono na China

A China tem uma longa história de cumprimento de suas metas políticas nacionais usando planejamento, regulação e outras abordagens de “comando e controle”. As metas de mitigação das mudanças climáticas, delineadas nas “ações de mitigação apropriadas nacionalmente” do país até 2020, e sua “contribuição determinada nacionalmente” para 2030, não são exceção. No entanto, desde o 11º Plano Quinquenal (2006-2010), houve apelos para uma maior utilização de instrumentos “baseados no mercado”.

Projetos piloto de ETS foram iniciados em 2013 após alguns anos de preparação e um mercado nacional de permissões foi lançado formalmente em 2021. No presente, o ETS cobre apenas o setor de geração de energia, que corresponde por cerca de 40% das emissões de CO2 da China. O desenho do mercado difere daquele adotado na UE em dois aspectos importantes. Em primeiro lugar, não existe um “limite rígido”, no qual o fornecimento de permissões de emissão diminui linearmente ao longo do tempo. Em vez disso, o fornecimento de licenças a cada ano é

uma função da intensidade de emissão “referencial” e da geração total de eletricidade. Em segundo lugar, as licenças são alocadas para cada usina de energia (com base em sua própria produção, multiplicada pela intensidade de emissões de referência) livremente, em vez de por meio de um leilão. Em comparação com o EU ETS, onde o nível de referência é definido nos 10% mais eficientes das usinas a carvão no mercado, o esquema chinês é relativamente conservador, definido em torno de 50-60% das usinas “mais” eficientes, para evitar uma lacuna entre a oferta e a demanda de licenças. Isso é compreensível nesta fase inicial.

O progresso do ETS nacional foi descrito como positivo (MEE, 2022),¹³⁴ mas também se argumentou que a política fez mais para estimular a competição entre usinas movidas a combustíveis fósseis (promovendo maior eficiência) do que promover a implantação de tecnologias renováveis (IEA, 2022).¹³⁵ Consequentemente, ainda há discussão sobre como reformar o esquema e se um imposto sobre o carbono faria um trabalho melhor.

Estudos anteriores

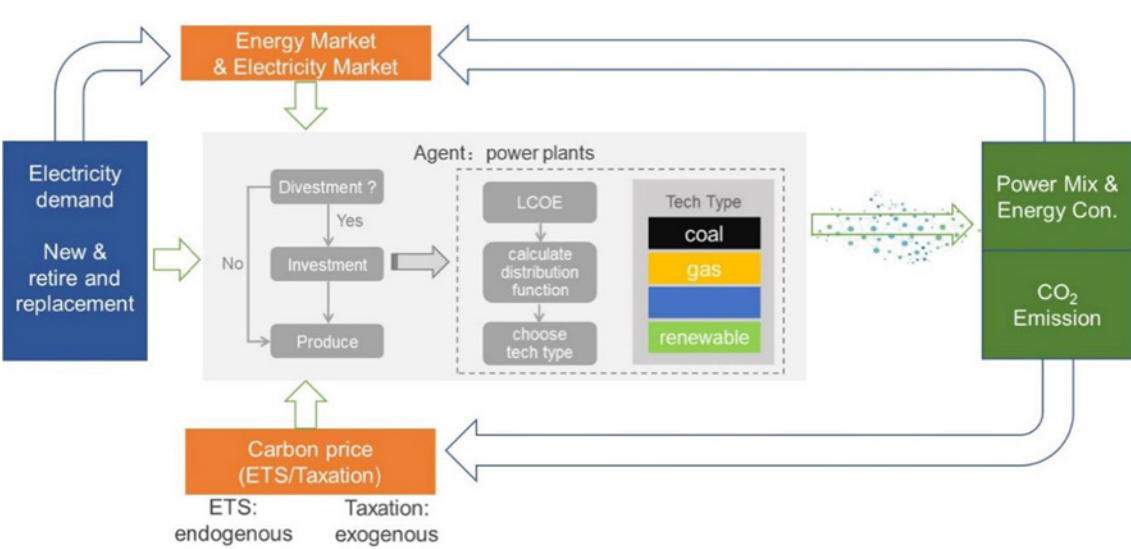
Muitos estudos compararam esses dois instrumentos de precificação de carbono em contextos aplicados. Alguns se concentraram em questões específicas,

como eficiência política, custo-efetividade, viabilidade institucional ou impactos distributivos^{136 137} enquanto outros usaram abordagens de modelagem, como modelos de equilíbrio ou modelos otimizados de custo, para avaliar as opções políticas.^{138 139 140}

Existem estudos de precificação de carbono sobre o caso da China usando ABM para examinar este ETS especificamente,^{141 142} como o trabalho da IEA e da Universidade de Tsinghua.¹⁴³ No entanto, todos esses estudos se concentram em apenas uma opção de política por vez e não comparam impostos e ETS.

Projeto do modelo baseado em agente da China
A estrutura do modelo é ilustrada na Figura 32. O modelo simula as decisões dos agentes que representam os operadores de usinas individuais. (Essa é uma diferença importante em relação ao modelo descrito na Parte 2, no qual os agentes são empresas que investem em um portfólio de usinas de diferentes tecnologias.) Os agentes decidem a cada ano se continuam operando suas usinas ou as desativam investem em algo novo. Novos agentes entram no mercado se a demanda por energia exceder a oferta. Quando um agente entra no mercado ou investe em uma nova usina, ele pode escolher entre as tecnologias de carvão, gás, biomassa, nuclear, hídrica, solar, eólica onshore e eólica offshore.

Figura 32: Ilustração do modelo de transição ABM-geração de energia.



¹³⁴ Ministry of Ecology and Environment. (2022). Annual report on China's policy and actions to address climate change. Available at: <https://www.mee.gov.cn/ywqz/ydqhbh/syqhbh/202210/W020221027551216559294.pdf> [Accessed October 27, 2022].

¹³⁵ IEA. (2021). The Role of China's ETS in Power Sector Decarbonisation. https://iea.blob.core.windows.net/assets/61d5f58d-4702-42bd-a6b6-59be3008ecc9/The_Role_of_China_ETS_in_Power_Sector_Decarbonisation.pdf

¹³⁶ Stavins, R. (2019). The Future of U.S. Carbon-Pricing Policy. M-RCBG Faculty Working Paper Series. Available online: <https://www.hks.harvard.edu/centers/mrcbg/publications/fwp/2019-02> (Accessed September 10, 2020.)

¹³⁷ Mathur, A. and Morris, A. (2014). Distributional Effects of a Carbon Tax in Broader U.S. Fiscal Reform. *Energy Policy* 66: 326-334.

¹³⁸ Fan X. et al. (2022). Is Price Commitment a Better Solution to Control Carbon Emissions and Promote Technology Investment? *Management Science*. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2022.4365>

¹³⁹ Hagmann, D et al. (2019). Nudging Out Support for a Carbon Tax. *Nat. Clim. Chang.* 9: 484-489.

¹⁴⁰ Li, W. et al. (2018). The Impact on Electric Power Industry under the Implementation of National Carbon Trading Market in China: A dynamic CGE analysis. *Journal of Cleaner Production* 200: 511-523.

¹⁴¹ Maosheng, D. and Wang, B. (2022). Consignment Auctions of Emissions Trading Systems: An Agent-Based Approach Based on China's Practice. *Energy Economics* 112: 106187.

¹⁴² Tang, L. et al. (2015). Carbon Emissions Trading Scheme Exploration in China: A multi-agent-based model. *Energy Policy*. 81: 152-169.

¹⁴³ <https://www.iea.org/reports/enhancing-chinas-ets-for-carbon-neutrality-focus-on-power-sector>

As decisões dos agentes sobre a operação ou descomissionamento de uma usina existente são baseadas em sua lucratividade. Se a planta for lucrativa, o agente continuará a operá-la. Os agentes têm racionalidade limitada e não tem fazer previsões perfeita, então tomam suas decisões probabilisticamente. Se uma usina não for lucrativa, quanto maior for o período de prejuízo, maior a probabilidade de o agente decidir abandoná-la.

Quando os agentes decidem qual tecnologia usar para uma nova planta, essa decisão é baseada na rentabilidade esperada de diferentes tecnologias, calculada a partir de sua geração de LCOE. Esta decisão é também probabilística. Os agentes são heterogêneos em suas preferências de risco: alguns são avessos ao risco, preferindo ficar com a tecnologia que possuem (geralmente carvão) e outros estão mais dispostos a experimentar novas tecnologias, mesmo quando seus custos sejam mais elevados. Para mais detalhes, consulte o apêndice.

Um aspecto importante da primeira regra de tomada de decisão neste modelo é que, para um agente continuar operando uma planta, ela só precisa ser lucrativa agora, sem qualquer consideração se uma mudança para uma planta alternativa usando uma tecnologia diferente pode ser mais lucrativa no futuro. Isso significa que existe uma inércia significativa no estoque das centrais existentes, havendo uma forte concorrência entre tecnologias apenas aplicável ao investimento em novas centrais. Usamos isso como um *proxy* para a situação real no mercado de eletricidade da China, onde os interesses de algumas concessionárias de energia de grande escala geralmente estão alinhados com a manutenção das usinas de carvão existentes, apesar do potencial de alternativas mais lucrativas. A preocupação em manter a segurança do abastecimento de eletricidade, para o qual a energia a carvão é vista como uma opção segura, é um fator significativo que reduz a motivação dos operadores das centrais elétricas existentes para substituí-las por tecnologias alternativas. O risco relativamente baixo e a baixa dificuldade de aumentar a eficiência da energia a carvão, em comparação com a substituição de usinas a carvão por uma tecnologia diferente, pode ser outro.

A demanda de eletricidade é exógena ao modelo e supõe-se que aumente ao longo do tempo.¹⁴⁴ As decisões dos agentes determinam coletivamente o mix de tecnologias de geração de eletricidade e, portanto, também as emissões totais.

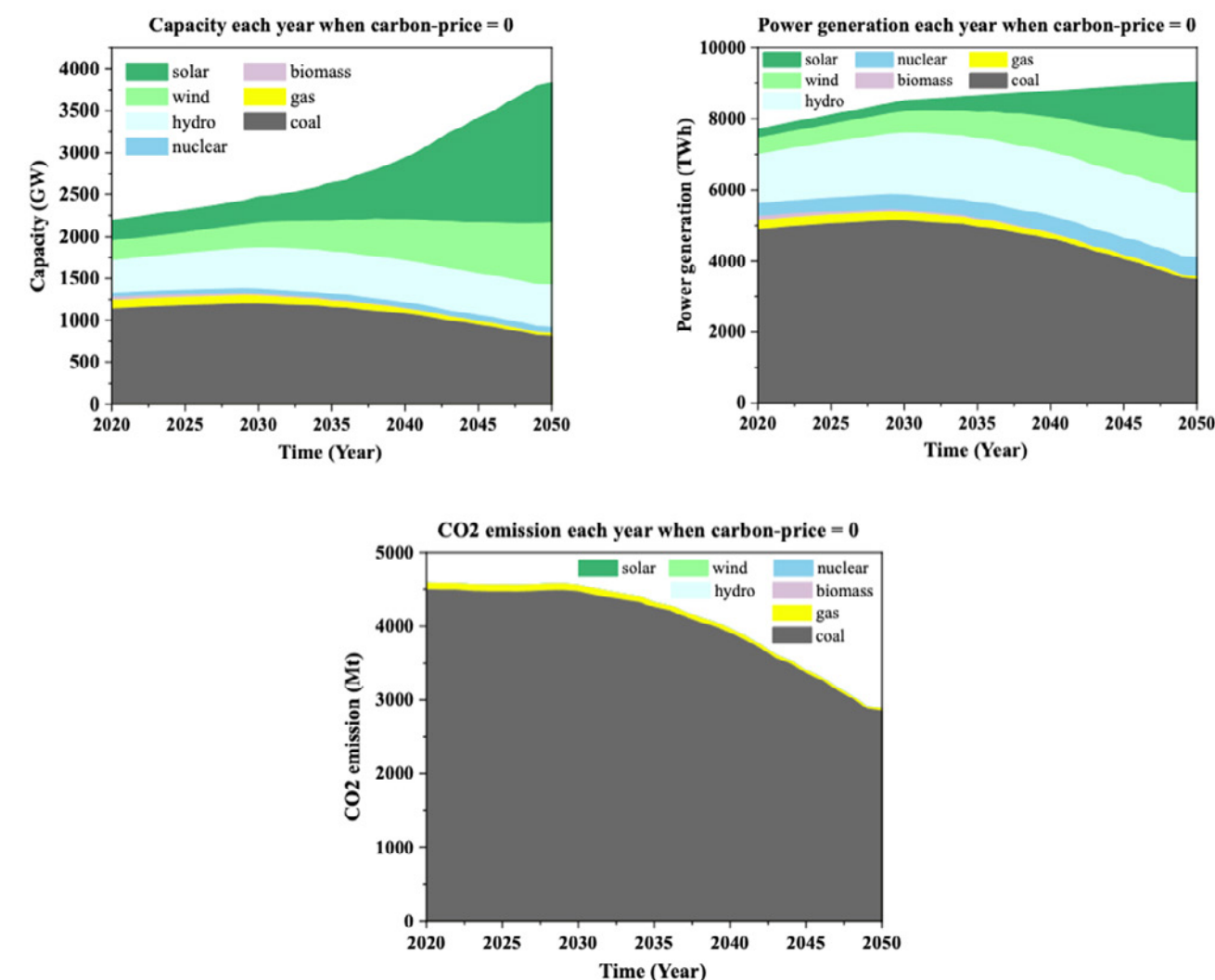
O modelo começa com 14.960 usinas, entre fósseis (cerca de 3.000 das quais são cobertas pelo ETS) e não fósseis, com capacidade total de 2.200 GW e geração total de eletricidade de 7.700 TWh em 2020 (o primeiro ano). As emissões de CO₂ no primeiro ano são de cerca de 4.500 Mt. Os atributos das usinas incluem capacidade, tipo de combustível, ano de construção, vida útil, média de horas de trabalho por ano, eficiência energética e intensidade de emissão, com base em fontes de informação abertas e suposições relacionadas. O progresso tecnológico em tecnologias renováveis (e, portanto, pressupostos de custo) é tratado como uma variável exógena, com base em curvas de aprendizado. A capacidade, geração de energia e distribuição das emissões de CO₂ no ano base são apresentadas no apêndice.

As seguintes opções de política foram testadas no modelo:

- Nenhuma política (*business as usual*).
- Um imposto de carbono de 30 Yuan/tCO₂ (~\$4,3USD/tCO₂).
- Um imposto de carbono de 50 Yuan/tCO₂ (~\$7,2USD/tCO₂). Nota: esses dois níveis para o imposto de carbono foram escolhidos para serem semelhantes ao preço médio do carbono atualmente gerado pelo ETS da China (51,20 Yuan/tCO₂ em relação ao período de julho de 2021 a dezembro de 2021).
- Um sistema de comércio de licenças de emissão com soft cap (usando a abordagem de benchmark conforme descrito em Zhang et al, 2022) e alocação gratuita de permissões. Este é o ajuste mais próximo da política de precificação de carbono atualmente implementada na China.
- Um ETS com hard cap e permissões alocadas por leilão (consulte o apêndice para obter detalhes sobre o projeto de leilão usado no modelo).

Em todos os casos, o ano base foi 2020, e o modelo simulou a evolução do sistema elétrico até 2050.

Figura 33: Evolução da tecnologia ao longo do tempo no cenário BAU: capacidade (canto superior esquerdo), geração de energia (canto superior direito), emissão de CO₂ (inferior).



Resultados e discussão

Business as usual

No cenário BAU, não há precificação do carbono ou outra intervenção política. A capacidade de potência, geração de energia e emissões de CO₂ por tipo de combustível são mostradas na Figura 33.

A tendência geral é, não surpreendentemente, uma transição lenta. A capacidade de combustível fóssil, particularmente carvão, diminui com o tempo, enquanto a capacidade não fóssil se expande. Solar e eólica se tornam dominantes como novas tecnologias, enquanto a capacidade total de energia cresce para 2.500 GW em 2030 e para quase 4.000 GW em 2050.

O ponto de virada do desenvolvimento da energia solar, devido à sua rápida taxa de inovação, é por volta de 2035, após o qual seu crescimento é acelerado. A contribuição do carvão geralmente se mantém estável

até 2030, depois começa a diminuir. Até 2050, a participação das principais tecnologias na capacidade de energia mudou significativamente em comparação com 2020: a participação do carvão cai de 52% para 21%; a participação da energia eólica sobe de 11% para 19%, e a participação da energia solar sobe de 11% para 44%. O papel das unidades movidas a gás, energia hidrelétrica e nuclear permanece relativamente inalterado.

O mix de tecnologias de geração de energia segue o mesmo padrão da capacidade de energia, uma vez que o modelo assume que o fator de carga de cada tecnologia permanece inalterado. As emissões de CO₂, que vêm principalmente de usinas de carvão e gás, especialmente carvão, tendem a se manter estáveis antes de 2030 e depois diminuem significativamente para menos de 3.000 Mt em 2050 – cerca de dois terços do nível em 2020.

¹⁴⁴ A suposição relevante é de Jiang e Chen (2021) onde a demanda em 2030 e 2050 é de até 8.500 TWh e 9.000 TWh, respectivamente. Essas suposições podem ser muito menores do que as previsões mais recentes. Ver: Jiang K and Chen Y eds. 2021. China Climate and Environment Evolution 3.

Imposto sobre o carbono

A Figura 34 mostra a capacidade de energia, geração de energia e emissões de CO₂ ao longo do tempo no cenário de imposto de baixo carbono (CT-30). A Figura 35 mostra o mesmo para o cenário de alto imposto de carbono (CT-50). A parte inferior direita da Figura 35 compara as emissões ao longo do tempo para o imposto de carbono em níveis baixo e alto e para o cenário BAU.

Os resultados mostram que o imposto de baixo carbono tem um efeito limitado em acelerar a transição antes de 2030, em comparação com o

cenário BAU. A razão provavelmente é que esse imposto baixo é suficiente apenas para empurrar as usinas de carvão mais antigas e menos eficientes para o descomissionamento, enquanto a maior parte da frota de carvão permanece lucrativa e continua a operar. À medida que os custos da energia eólica e solar diminuem, o imposto de baixo carbono aumenta moderadamente sua vantagem sobre o carvão na competição por investimentos em novas capacidades, e isso leva as emissões a divergirem ainda mais do BAU. Mesmo assim, as emissões em 2050 estão em torno de 2.500 Mt, apenas cerca de um sexto abaixo do nível BAU naquele ano.

Figura 34: Evolução da tecnologia ao longo do tempo no cenário CT-30: capacidade (acima à esquerda), geração de energia (acima à direita), emissão de CO₂ (abaixo).

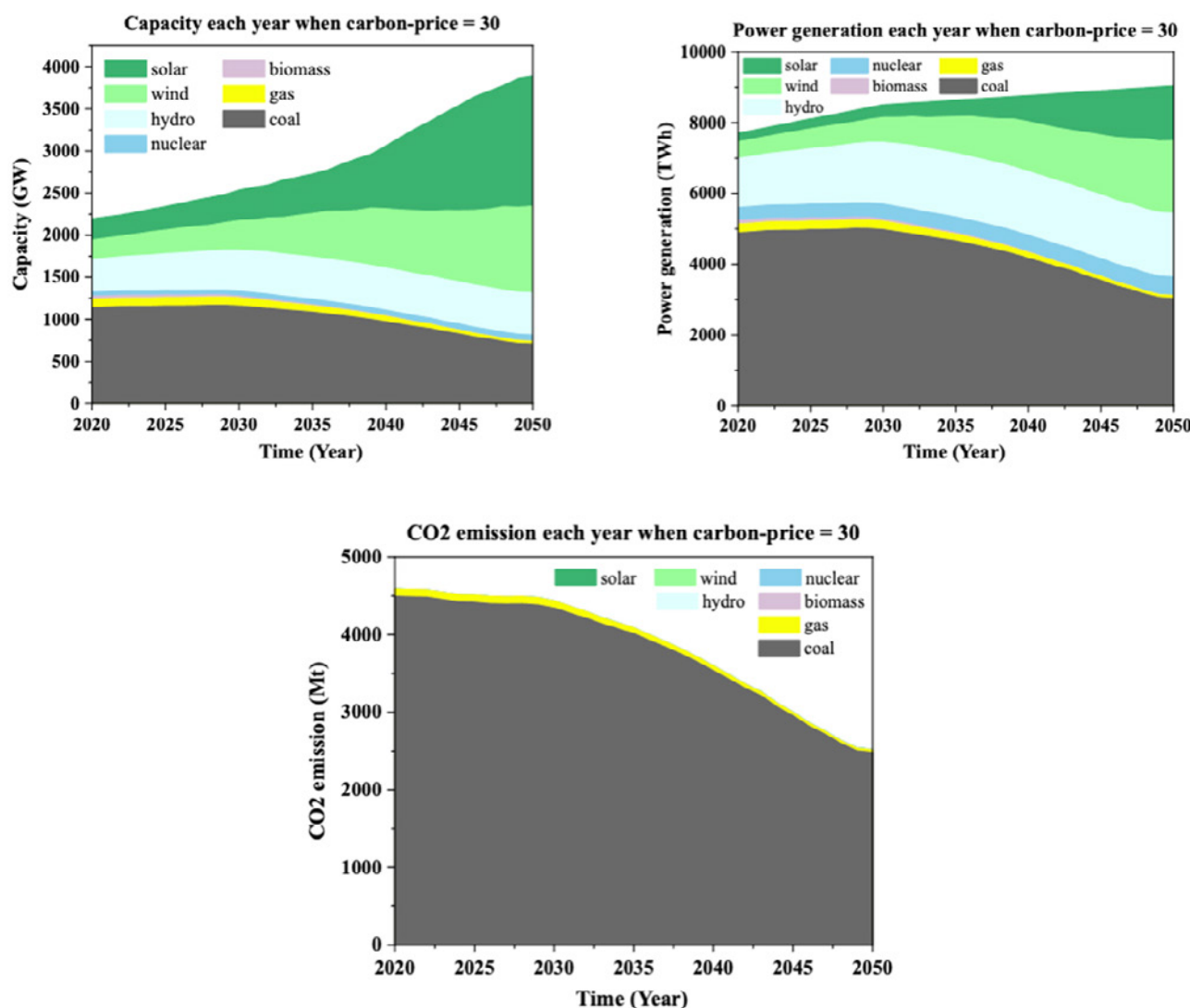
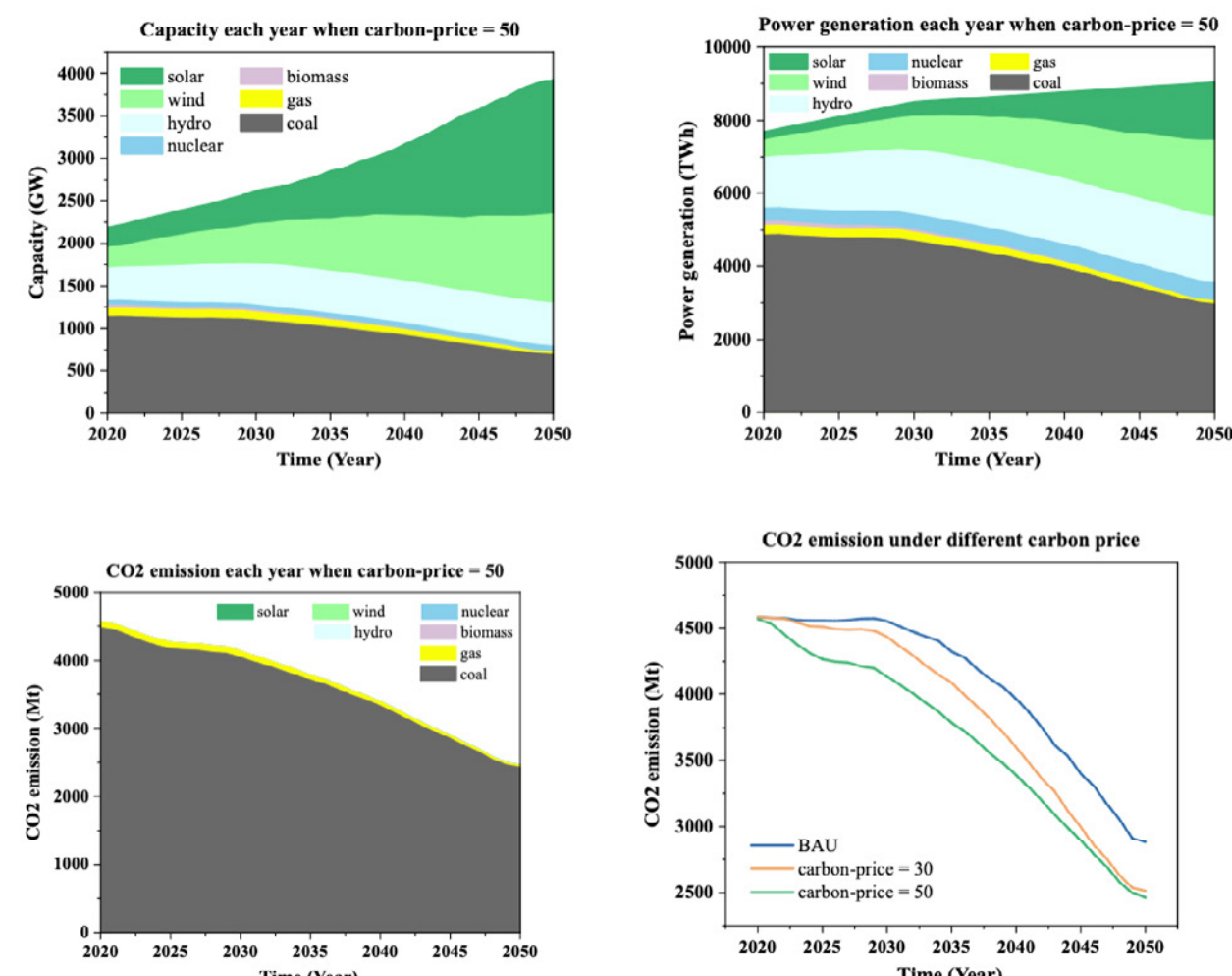


Figura 35: Evolução da tecnologia no cenário CT-50: capacidade (canto superior esquerdo), geração de energia (canto superior direito) e emissão de CO₂ (canto inferior esquerdo); comparação de BAU, CT-30 e CT-50 na emissão de CO₂ (canto inferior direito).



A alta taxa de carbono tem um impacto muito maior na primeira década, com as emissões diminuindo rapidamente no período de 2020-2030, durante o qual a taxa de baixo carbono tem pouca influência. No entanto, a vantagem do alto imposto de carbono diminui nos anos posteriores, com seu impacto no mix de tecnologias e nas emissões anuais quase convergindo com o do imposto de baixo carbono em 2050. A razão pode ser que, nos estágios finais da transição, solar e eólica já superam os combustíveis fósseis para novos investimentos em capacidade de energia sem qualquer necessidade de um preço de carbono. Ao mesmo tempo, mesmo esse imposto de carbono “alto” (de CNY 50 ou US\$ 7,2/tCO₂) é

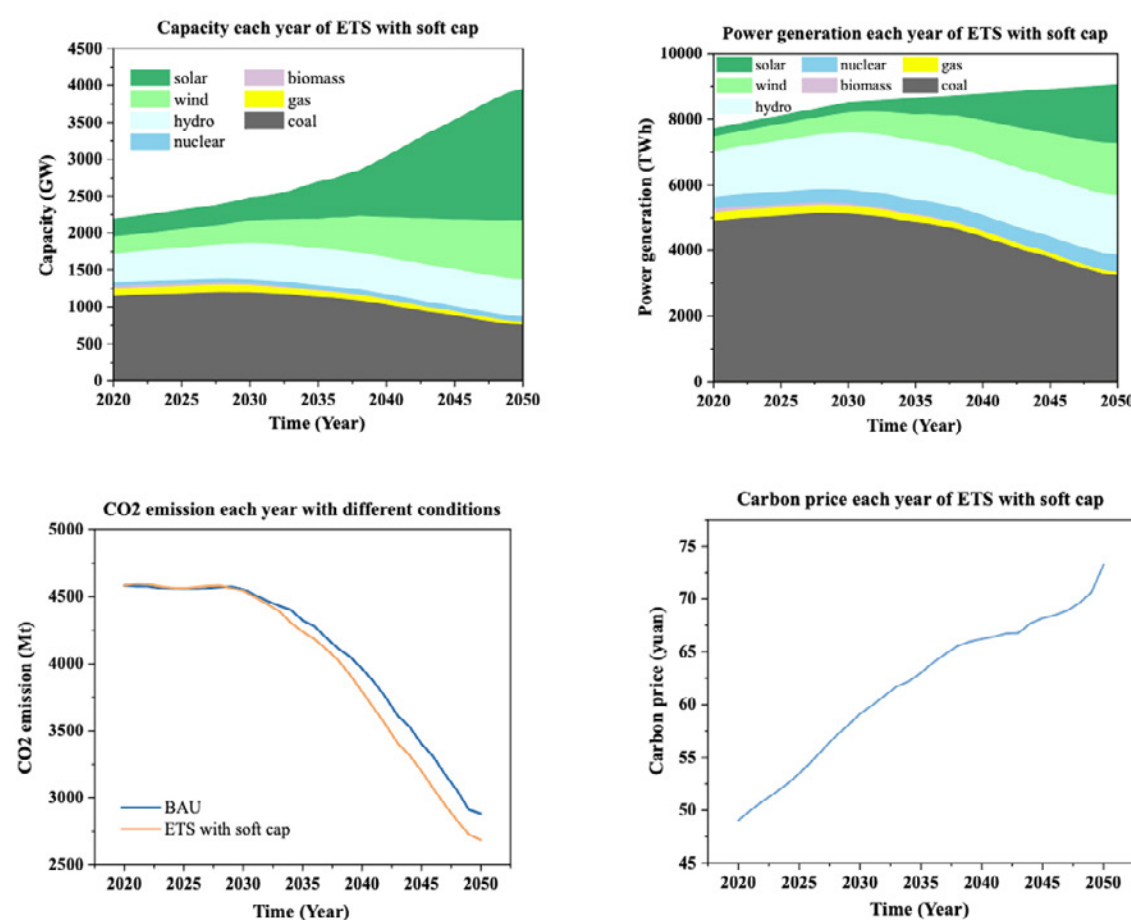
muito baixo para impedir que a maioria das usinas a carvão sejam lucrativas, embora os lucros estejam inevitavelmente diminuindo; consequentemente, a maior parte da frota de carvão existente continua a operar inalterada.

Uma conclusão para a política é que, em um mercado onde há pouca competição entre as tecnologias de geração existentes, o imposto de carbono só terá um impacto substancial e sustentado nas emissões se for alto o suficiente para tornar uma usina de carvão típica não lucrativa. Em nossa simulação, isso exigiria um imposto de carbono de cerca de CNY 120/tCO₂ (ou US\$ 17/tCO₂).

ETS com soft cap e alocação gratuita

Neste cenário, cada agente recebe licenças de emissão com base em sua produção de eletricidade e na intensidade de carbono de referência, conforme descrito acima. A referência diminui gradualmente ao longo do tempo, à medida que a eficiência das plantas mais eficientes melhora. As permissões são alocadas livremente e podem ser negociadas entre os agentes. Quando uma usina menos eficiente tem escassez de permissões devido ao *benchmark* em queda, ela deve comprar créditos no mercado. O preço do carbono resultante desse comércio de licenças é

Figura 36: Evolução da tecnologia ao longo do tempo no cenário ETS: capacidade (canto superior esquerdo), geração de energia (canto superior direito), emissão de CO₂ (canto inferior esquerdo) e preço do carbono (canto inferior direito).



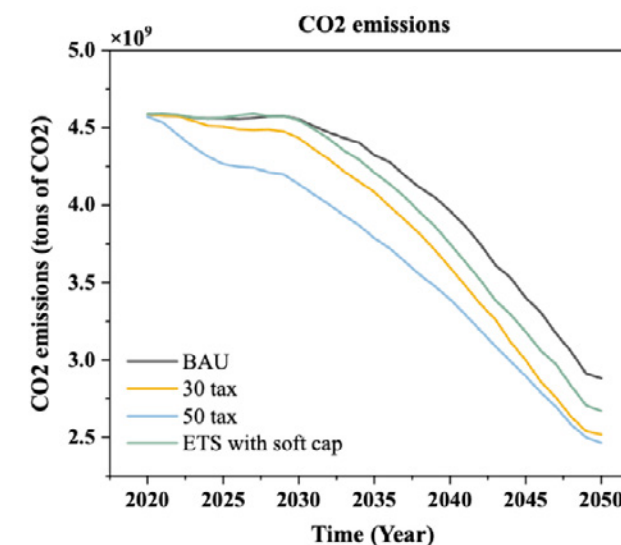
Como mostra a Figura 36 (canto inferior esquerdo), o ETS com *soft cap* e alocação gratuita quase não tem efeito sobre as emissões no período 2020-2030, em comparação com o BAU. Depois de 2030, há algum efeito, mas permanece extremamente limitado, com as emissões em 2050 sendo menos de 10 % abaixo do nível BAU daquele ano, apesar de um preço de carbono em constante aumento.

calculado usando uma fórmula empírica desenvolvida por Chappin (2011)¹⁴⁵ (consulte o apêndice para obter detalhes).¹⁴⁶ Para as usinas a carvão menos eficientes, isso representa um custo; para as usinas de carvão altamente eficientes, uma fonte de renda.

Os resultados de modelagem para capacidade de energia e geração de energia por cada tecnologia, e emissões de CO₂, são ilustrados na Figura 36. A parte inferior direita da Figura 36 mostra como o preço da permissão muda ao longo do tempo.

A Figura 37 compara as emissões ao longo do tempo do ETS com *soft cap* e alocação gratuita para as trajetórias de emissões dos dois cenários tributários, bem como BAU. Isso mostra que o efeito do ETS é ainda menor do que o do imposto de baixo carbono.

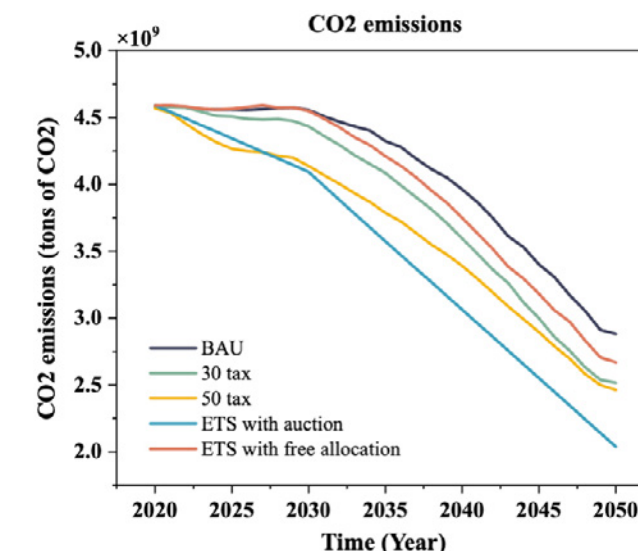
Figura 37: Ilustração das emissões de CO₂ em todos os cenários.



A explicação para isso está nos dois aspectos do design desta versão do ETS. A atribuição gratuita de permissões significa que apenas uma pequena proporção das emissões está sujeita a qualquer preço do carbono. Mesmo as usinas a carvão mais antigas e menos eficientes só precisam pagar para completar suas permissões alocadas para o número total de licenças necessárias; as emissões abrangidas pela sua atribuição gratuita não são precificadas. Ao mesmo tempo, o efeito de ter um *soft cap* baseado na intensidade de carbono de referência é tal que as usinas de carvão mais eficientes não pagam nenhum preço de carbono em nenhuma de suas emissões e, em vez disso, recebem um bônus pela venda de suas permissões alocadas livremente. Em vez de dar um forte impulso à transição, a política dá apenas um pequeno empurrão.

Uma conclusão para a política é que provavelmente serão necessárias mudanças significativas no desenho do ETS para que ele tenha um impacto substancial nas emissões, tais como a introdução de um *hard cap* nas emissões que seja decrescente ao longo do tempo e/ou a alocação de permissões de emissões por leilão em vez de livremente.

Figura 38: Emissões ao longo do tempo para o ETS com licenças alocadas por livre alocação e via leilão, em comparação com taxas de baixo e alto carbono e BAU.



ETS com hard cap e leilão de permissões

Nesse cenário, o ETS tem um *hard cap*: a oferta total de permissões é definida pelo governo. Em nosso exemplo, o limite é definido de acordo com as metas da China de atingir o pico de emissões até 2030 e atingir a neutralidade de carbono até 2060. A trajetória fixada pelo limite é uma redução linear do nível atual de emissões para 4.000 Mt em 2030 e, em seguida, uma queda linear mais acentuada para 2.000 Mt em 2050. (Attingir a meta de neutralidade de carbono exigiria uma maior inclinação da trajetória entre 2050 e 2060.¹⁴⁷) Os agentes passam a acessar as permissões em leilões, com o lance final definindo o preço do carbono para todo o mercado, a cada ano. Os detalhes desse processo são descritos no apêndice.

A Figura 38 mostra que esta versão do ETS é significativamente mais eficaz do que a livre alocação de permissões. Para o período 2020-2030, funciona de maneira semelhante ao alto imposto de carbono. Para além de 2030, supera o alto imposto de carbono, resultando em emissões anuais quase um terço abaixo do BAU em 2050. A razão para isso é simples: o *hard cap* das emissões limita a quantidade de energia movida a combustíveis fósseis que é permitida. As usinas de carvão são gradualmente forçadas a sair do mercado, começando pelas menos eficientes, e as emissões caem de acordo com o limite.

¹⁴⁵ Chappin, E. (2011). Simulating Energy Transitions, Next Generation Infrastructures Foundation, Delft, The Netherlands. Available online: <http://chappin.com/ChappinEJL-PhDthesis.pdf>

¹⁴⁶ Para validar a fórmula, foi calculado o preço de outorga para o ano base, utilizando o benchmark de 877gCO₂/kWh. O resultado dá um preço médio do carbono de CNY 54,2/tCO₂ (com um limite flexível de emissões de cerca de 4.280MtCO₂). Esses resultados estão próximos de seus valores reais na China, fornecendo confiança na aplicabilidade dessa fórmula (que foi originalmente projetada para simular o EU ETS).

¹⁴⁷ This is only one possible trajectory for power sector emissions towards meeting the 2060 target. We are not suggesting that it is the most cost-effective trajectory.

Vale a pena considerar até que ponto este desenho de ETS está funcionando como uma política “baseada no mercado”. Como há uma concorrência limitada entre as tecnologias de geração de energia existentes, as usinas a carvão continuam a operar por mais tempo do que em um mercado mais competitivo. Isso significa que a demanda por permissões de emissão é sempre maior do que a oferta, conforme mostrado na Figura 39, e o preço do carbono aumenta constantemente ao longo do tempo, conforme mostrado na Figura 40. (Isso é

muito diferente do preço flutuante do carbono visto no desenho de ETS em vigor na União Europeia.) Apesar desse aumento constante, o preço do carbono nunca atinge o nível que tornaria uma usina de carvão existente típica não lucrativa (cerca de CNY 120/tCO₂). Dadas essas características, parece que o ETS está funcionando mais como uma regulação: um efeito semelhante poderia ser alcançado por uma regulação que estabelecesse um limite para a intensidade de carbono permitida de usinas de energia, que diminuiu ao longo do tempo.

Figura 39: Razão entre demanda e oferta de permissões de emissão ao longo do tempo. Uma relação de mais de 1 indica que a demanda é maior do que a oferta.

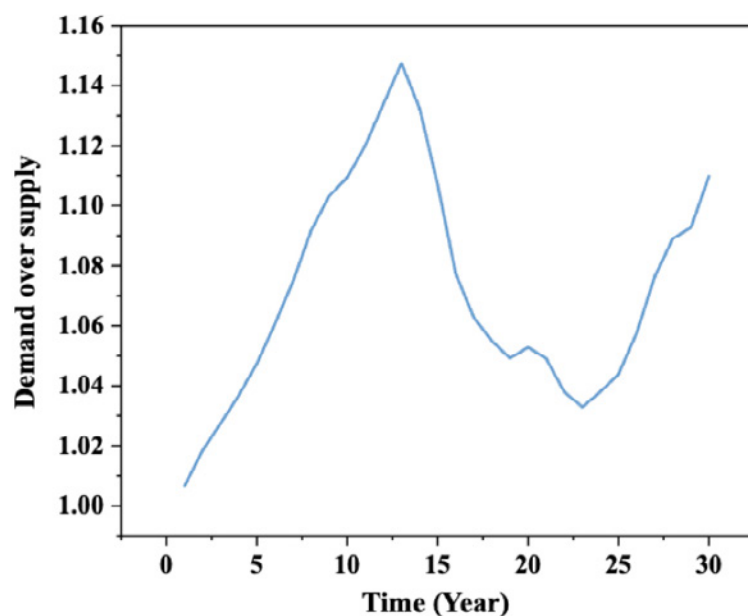
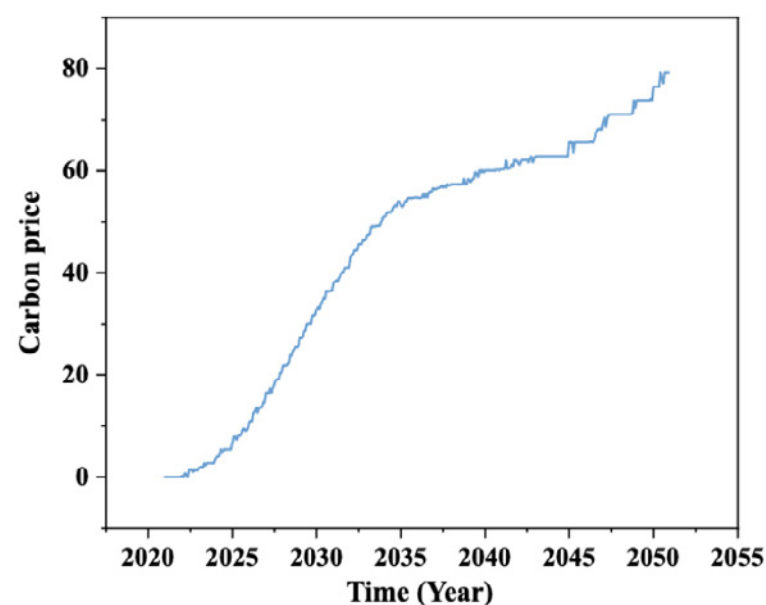


Figura 40: Preço do carbono ao longo do tempo.



Conclusões da política da Parte 3

A falta de competição entre as tecnologias no mercado de geração de energia existente (em oposição aos investimentos em nova capacidade) limita a eficácia de qualquer forma de política baseada em preços. É difícil se mover para longe de ampla capacidade de geração de energia a carvão existente. Voltando à Figura 27, o vínculo entre custo relativo de tecnologia limpa e adoção da tecnologia limpa é enfraquecido, e isso enfraquece o *feedback* de reforço de adoção de tecnologia limpa e de redução de custos.

Em tal mercado, a taxaço do carbono pode contribuir para reduzir as emissões ao influenciar a escolha da tecnologia para a nova capacidade de energia, mas essa contribuição é modesta. Parece provável que um imposto sobre o carbono tenha um impacto substancial e sustentado nas emissões apenas se for alto o suficiente para tornar as usinas de carvão existentes não lucrativas, de modo que sejam cada vez mais substituídas por tecnologias de emissão zero.

Nesse mercado, um ETS com soft cap, nível de *benchmark* frouxo e livre alocação de permissões leva a emissões semelhantes a BAU. Um ETS com hard cap e leilão de licenças pode ter um efeito mais forte, mas seu funcionamento parece ser semelhante ao de uma regulação com foco em intensidade de carbono. Indiscutivelmente, uma regulação seria uma maneira administrativamente mais simples de alcançar o mesmo resultado.

O experimento do ETS da China no setor de energia deve ser desenhado com cautela para evitar perturbações na geração de energia, fornecimento de energia e crescimento econômico, dado o contexto das metas de desenvolvimento do país, as tensões geopolíticas e os impactos da pandemia de Covid. O progresso observado nesses dois anos (2021-2022) e os resultados simulados descritos anteriormente parecem relativamente modestos; no entanto, pode-se esperar um progresso mais significativo quando o sistema incorporar e coordenar de forma adequada uma ampla reforma do mercado de eletricidade.

É provável que a introdução de maior concorrência no mercado de eletricidade seja desejável em qualquer caso, para permitir uma maior adoção de tecnologias de geração de energia de baixo custo e baixas emissões. Se o mercado da China for reformado nessa direção, as opções de política de precificação do carbono serão cada vez mais parecidas com as descritas na Parte 2, de modo que um imposto sobre o carbono provavelmente conduzirá a um progresso mais rápido na transição do que um ETS de força equivalente.

ESTUDO DE CASO:

Ativando Pontos de Inflexão de Veículos Elétricos na China, Índia, Europa e EUA

AILEEN LAM (UNIVERSIDADE DE MACAU), PIM VERCOULEN (CAMBRIDGE ECONOMETRICS & UNIVERSIDADE DE EXETER), JEAN-FRANCOIS MERCURE (BANCO MUNDIAL), SIMON SHARPE (CLIMATE CHAMPIONS TEAM)

Questão de política: Quais políticas, individualmente e combinadas, são mais eficazes na condução da transição envolvendo veículos elétricos? Como uma transição rápida se compara a uma transição lenta, em termos de custos no setor de transporte rodoviário e de consequências macroeconômicas?

Região: Global

Método: E3ME- FTT: Transporte

Principais conclusões: Um ponto de inflexão envolvendo a paridade de custo entre veículos elétricos (*electric vehicles* - EVs) e veículos com motor de combustão interna (*internal combustion engine vehicles* - ICEVs) está próximo nos principais mercados. Um subsídio a veículos elétricos que preencha a lacuna de custo entre EVs e ICEVs pode se tornar neutro em termos de receita com apenas um pequeno imposto sobre ICEVs. Regulações e cotas tecnológicas são mais econômicos do que incentivos financeiros para conduzir a transição para EVs quando usados individualmente e também podem contribuir para pacotes de políticas altamente eficazes. Uma transição rápida para EVs economiza custos em comparação com uma transição lenta. As consequências macroeconômicas da transição para veículos elétricos provavelmente serão mais positivas para os grandes países importadores de petróleo e mais negativas para os grandes países exportadores de petróleo.

Engajamento: Contribuíram para este estudo interações com governos de vários dos países parceiros do EEIST, por meio das quais os formuladores de políticas expressaram interesse em saber o nível em que os subsídios a EVs seriam eficazes, o custo-benefício relativo de diferentes políticas e o efeito da implementação de determinada política com níveis variados de rigor.

Resumo: Os autores usam o modelo E3ME- FTT: Transporte para considerar como um conjunto de políticas usadas individualmente e em conjunto pode acelerar a transição para veículos de emissão zero na Índia, China, EUA e Europa.

Introdução

O setor de transporte representou 23% das emissões globais de CO₂ da combustão de combustível em 2021.¹⁴⁸ O transporte rodoviário de passageiros gera 45% das emissões de transporte e 30% de seu crescimento e, portanto, requer atenção urgente dos formuladores de políticas.¹⁴⁹ Os veículos elétricos (EVs)¹⁵⁰ têm sido vistos como um componente importante da solução para descarbonizar o transporte rodoviário de passageiros.¹⁵¹ Devido ao suporte sustentado da política de EVs já introduzido em todo o mundo, o número desses veículos nas estradas aumentou significativamente, com cerca de 16,5 milhões de unidades globalmente em 2021. Ao mesmo tempo, os preços das baterias caíram significativamente de US\$ 1.100/kWh em 2010 para os EUA \$ 137/kWh em 2020¹⁵² – uma queda de 88%, em grande parte resultado de economias de escala na produção e inovação por meio de várias formas de aprendizado, à medida que a produção e as vendas aumentam. No entanto, após uma década de declínio, o custo das baterias em todos os setores aumentou para cerca de US\$ 150/kWh em 2022, como resultado da elevação dos preços dos materiais.¹⁵³

À medida que as vendas de elétricos aumentam, vários países estabeleceram metas para tornar todos os carros novos com emissão zero.¹⁵⁴ Por exemplo, a UE agora concordou em exigir que todas as vendas de carros novos tenham emissão zero até 2035. No entanto, alguns mercados importantes, incluindo os EUA e a China, até agora estabeleceram apenas metas provisórias – visando a participação de veículos elétricos nas vendas de carros até 2030 de 50% e 40%, respectivamente. Suas decisões sobre o ritmo da transição provavelmente levarão em conta as percepções de viabilidade, estimativas da acessibilidade futura dos EVs¹⁵⁵ e expectativas do impacto das políticas na competitividade industrial, empregos, segurança energética e crescimento econômico.

Este estudo de caso apresenta evidências de que os principais mercados estão se aproximando de pontos de inflexão envolvendo a difusão irreversível de veículos elétricos. O estudo também identifica pacotes de políticas que podem acelerar a transição para veículos

de emissão zero (*zero-emissions vehicles* – ZEVs) e a redução nos seus custos e destaca os benefícios macroeconômicos de uma transição rápida (levando a 100% de vendas de ZEVs em 2035 nos principais mercados) em comparação com uma transição lenta. O sucesso inicial da política nos principais mercados de automóveis poderia induzir uma transição para elétricos no resto do mundo, aumentando a acessibilidade desses veículos, enquanto, ao mesmo tempo, a adoção de EVs no resto do mundo poderia antecipar a paridade de custo entre esses veículos e os movidos a combustíveis fósseis nos principais mercados. Essas projeções foram simuladas usando o FTT: Transporte com base no custo observado para mais de 2.000 modelos de veículos e dados de difusão dos últimos 12 anos. O modelo E3ME foi usado para estimar os resultados macroeconômicos.

FTT: descrição do modelo de transporte

Visão geral

O modelo *Future Technology Transformations* (FTT) é um método de estrutura flexível que modela a difusão tecnológica dinamicamente, com base na competição tecnológica nos mercados. O modelo FTT: Transporte assume a presença de um mercado de veículos adaptativo, em evolução e dependente do caminho, com consumidores que são agentes heterogêneos e fabricantes de veículos que fornecem o mercado em resposta à demanda. Assumimos preferências reveladas, na medida em que a distribuição de custos observada para as vendas recentes de veículos corresponde à heterogeneidade das preferências e escolhas do consumidor.

O arcabouço do FTT modela a difusão tecnológica por um conjunto de equações diferenciais logísticas da família Lotka Volterra, que representam processos graduais de substituição tecnológica. Os processos de difusão são dependentes da trajetória e envolvem *feedbacks* positivos que são capturados pela estrutura FTT. Sob essa estrutura, os consumidores são mais propensos a escolher uma tecnologia que tenha custos mais baixos e uma maior participação de mercado como resultado de disponibilidade, visibilidade, influência social e efeitos de rede, bem como se for mais barata.

¹⁴⁸ IEA. (2021). World Energy Outlook.

¹⁴⁹ IEA. (2021). World Energy Outlook.

¹⁵⁰ EVs include both battery electric vehicles (BEVs) and plug-in electric vehicles (PHEVs).

¹⁵¹ IEA. (2022). Global EV Outlook 2022.

¹⁵² Bloomberg NEF. (2021). Electric Vehicle Outlook.

¹⁵³ Bloomberg NEF. (2022). Electric Vehicle Outlook.

¹⁵⁴ Governo do Reino Unido. (2021). Declaração da COP26 sobre como acelerar a transição para carros e vans 100% com emissão zero. <https://www.gov.uk/government/publications/cop26-declaration-zero-emission-cars-and-vans/cop26-declaration-on-accelerating-the-transition-to-100-zero-emission-cars-e-vans>

¹⁵⁵ Bloomberg NEF. (2021) Hitting the EV Inflection Point.

Modelando a heterogeneidade com a teoria da escolha discreta

Os consumidores no mercado de veículos são heterogêneos e as escolhas são feitas de forma probabilística. Assumimos que a heterogeneidade do mercado pode ser derivada da “preferência revelada” do consumidor (ou seja, suas escolhas de veículos). Isso é simulado por consumidores que fazem compras com base na disponibilidade e custo dos modelos de carros no mercado, e o modelo pressupõe implicitamente que os fabricantes de automóveis abastecem o mercado de forma que corresponda às preferências dos consumidores. Na teoria da escolha discreta, os consumidores têm gostos heterogêneos e atribuem diferentes pesos de utilidade às diferentes características do produto.

O modelo FTT usa uma versão modificada da teoria da escolha discreta na forma de uma teoria evolutiva. Ele usa distribuições de custos observadas para representar a heterogeneidade do agente (uma forma de preferências reveladas). As decisões do consumidor são modeladas com cadeias de logits binários. Na escolha discreta, as escolhas são feitas de forma probabilística, o que significa que fatores não observados, como variação de gosto e heterogeneidade interpessoal, são levados em consideração no modelo de escolha discreta. Em termos de transporte, a probabilidade de escolha de um determinado veículo é influenciada pela amplitude da distribuição de custos para cada segmento da tecnologia automotiva e pela participação de mercado da tecnologia. Portanto, uma política não leva a uma difusão instantânea de veículos elétricos e os consumidores não respondem aos incentivos simultaneamente.

O custo nivelado de transporte (LCOT)

Para o componente de tomada de decisão deste modelo, separamos o investidor em tecnologia de transporte do consumidor de serviços de transporte. Pensamos neles como entidades separadas para maior clareza, embora em alguns casos possam ser a mesma pessoa. Quer os papéis sejam desempenhados pelos mesmos atores ou não, eles são bastante distintos, uma vez que o investidor compra um veículo para vender um serviço de transporte ao consumidor. Isso é feito para estabelecer a distinção entre investimento em tecnologia e competição de mercado associada e o consumo do serviço que as tecnologias produzem. Também permite a possibilidade de uma pessoa que compra um carro ainda poder viajar de trem ou avião e não usar o carro que comprou. A escolha do modal é distinta da escolha da tecnologia, mesmo quando realizada pela mesma pessoa. O

custo do veículo, percebido pelo investidor que adquire um veículo ou unidade de tecnologia de transporte, deve ser considerado incluindo todos os componentes relevantes para a tomada de decisão. Muitos dos componentes são fáceis de quantificar a partir dos dados disponíveis. Outros não são diretos, e mostramos aqui como isso é feito. Quando se compra um veículo, faz-se um investimento inicial, ou obtém-se um empréstimo pelo custo de capital, passando a ser os custos de combustível e manutenção:

$$LCOT_i = \sum_t \frac{(I_i - EVS_i) + \sum_t \frac{RT_i(t)}{CF_i} + (F_i(t) + FT_i(t)) * (FE_i(t) * Dist_i) + MR_i(t)}{\sum_t \frac{1}{(1+r)^t}}$$

Figura 41: Equação que mostra o custo nivelado de transporte. Aqui I_i , F_i e MR_i são os custos médios de capital (em US\$), custo de combustível (em US\$/litro) e custo de manutenção (em US\$/km), respectivamente. EVS_i representa subsídios a veículos elétricos, pagos aos compradores de carros (e, portanto, custo negativo) no momento da compra. FT_i é o imposto sobre o combustível, em USD/litro. O custo do combustível depende do consumo de combustível $FE_i(t)$ e da distância percorrida a cada ano ($Dist_i$). RT_i é o imposto de registro anual, que é específico do veículo e da classe, pago pelos proprietários de automóveis uma vez por ano. CF_i é o fator de capacidade, em km/ano.

Conforme inferido da distribuição de preços de venda, os custos de transporte não são os únicos fatores que os consumidores consideram ao comprar um veículo. Muitos aspectos adicionais, como por exemplo, conforto e luxo, são valorizados pelo consumidor, dos quais temos poucas informações além da distribuição de preços do que se compra. Sabemos que as tecnologias têm custos financeiros diferentes, principalmente nas classes de tamanho de motor; apesar disso, custos mais altos são compensados por benefícios percebidos mais altos, de modo que veículos de luxo de custo mais alto coexistem com veículos econômicos muito mais baratos.

Se estivéssemos simulando a difusão de tecnologia com base em simples comparações de distribuição LCOT, as tecnologias com LCOT mais baixo seriam difundidas com mais sucesso, o que não é consistente com nossos dados históricos. Claramente, faltariam componentes no LCOT – por exemplo, conforto, aceleração e estilo – que podemos chamar de “intangíveis”. Definimos intangíveis para este modelo como a diferença entre o custo generalizado, que leva à difusão observada, e o LCOT, calculado a partir das propriedades pecuniárias dos veículos para os quais temos dados. O valor dos intangíveis é um parâmetro empírico obtido ao fazer com que a trajetória de difusão do FTT coincida com a trajetória observada em nossos dados históricos, no ano de início da simulação.

Projeção da população de veículos

Diversos modelos são usados para previsão de demanda de transporte, consumo de energia e níveis de emissão. Entre eles, um dos mais conhecidos é o modelo econométrico de elasticidade-renda da frota usando uma função logística. Historicamente, o crescimento do PIB e o desenvolvimento econômico estão associados ao aumento da propriedade de veículos. Estudos anteriores fizeram projeções de propriedade de automóveis de passageiros com base no PIB.

A curva de Gompertz é uma curva de crescimento em forma de S que relaciona a propriedade de veículos per capita ao PIB per capita. Embora a sucata de veículos não seja explicitamente incluída, ela foi testada empiricamente para representar a tendência de crescimento do estoque de veículos.¹⁵⁶ Examinamos tendências no crescimento dos estoques de veículos para uma grande amostra de países e empregamos a função de Gompertz para estimar a relação entre o estoque de veículos e a renda per capita.

$$V_{i,t} = V_i^* e^{ae^{BEF_{i,t}}}$$

Figura 42: Seguindo os estudos anteriores, estimamos o estoque de carros com base no modelo de Gompertz.

Projeção de demanda de transporte de passageiros

A demanda por transporte é impulsionada pela renda, população, densidade urbana, estrutura familiar e outros fatores demográficos. Nesta seção, a estimativa de demanda compreende duas partes. A primeira é a construção de um modelo econométrico que prevê a demanda por veículos leves de passageiros (*passenger light-duty vehicles* – PLDV) (em km por veículo) usando preços de combustível, renda, urbanização, infraestrutura viária, densidade urbana e economia de combustível. Em seguida, usamos o modelo econométrico para prever a demanda futura de transporte de veículos particulares de passageiros (por veículo). Na segunda parte, desenvolvemos um modelo de estoque de veículos e projetamos o crescimento da propriedade futura de carros, que é usado para fazer projeções para a demanda total de PLDVs.

Simulações de políticas e interações no modelo FTT: Transporte

Incentivos financeiros como subsídios para EVs, impostos rodoviários e impostos sobre combustíveis afetam o custo de operação de um veículo e são calculados diretamente na Figura 41. No modelo, a regulação da economia de combustível influencia o

fluxo de valores das ações na categoria de tecnologia para veículos antigos ineficientes, enquanto novos ICEVs continuam a ser vendidos. Quando uma regulação econômica de combustível é introduzida, se restringem as vendas de veículos que não atendem ao padrão de eficiência exigido. Como resultado, o estoque de veículos na estrada será gradualmente substituído por veículos mais eficientes em termos energéticos.

Para cotas tecnológicas envolvendo EVs, assume-se que as políticas alteram exogenamente as participações dos tipos de veículos em um ponto específico no tempo. Assumimos que as participações de mercado fluem de carros convencionais para elétricos, atribuindo as participações exógenas mínimas correspondentes à exigência da nova tecnologia de veículo. Essa abordagem modela as cotas dentro de metas que exigem que os fabricantes alcancem porcentagens específicas de elétricos em suas vendas. Isso representa a versão mais simples da política e não é exatamente igual a algumas regras de EVs do mundo real, em que o governo estabelece uma cota de produção de veículos elétricos e isso pode ser cumprido por meio de um sistema de créditos. Aqui, assumimos que a cota para EVs é efetivamente aplicada, de modo que a participação de elétricos nas vendas de carros siga a trajetória definida pelo governo.

No modelo FTT, cada camada da política desempenha um papel específico na descarbonização do setor de transportes. Quando as políticas são simuladas simultaneamente no modelo, elas influenciam a eficácia umas das outras. Por exemplo, tributar veículos de alta emissão com um imposto sobre veículos incentivará os consumidores a comprar veículos de baixa emissão. Em um mercado de consumo com disponibilidade limitada de modelos elétricos, é mais provável que o consumidor escolha um carro a gasolina de baixa emissão em vez de um EV. No entanto, na presença das cotas tecnológicas para EVs, os fabricantes são encorajados a acelerar a implantação desses modelos, o que amplia a escolha para os consumidores. Isso torna o imposto mais eficaz em orientar as escolhas do consumidor para reduzir as emissões do que seria o caso sem a existência de tais cotas. Além disso, quando mais EVs são produzidos, mais rapidamente caem seus custos, levando a uma maior taxa de difusão. Dessa forma, o modelo representa a curva de difusão tecnológica em forma de S. Assim, as interações políticas emergem de forma endógena no modelo FTT: Transportes.

¹⁵⁶ Meyer, I. et al. (2012). Scenarios for Regional Passenger Car Fleets and their CO2 Emissions. Energy Policy, 41: 66-74

Proximidade de pontos de inflexão envolvendo EVs

Embora os preços de compra de elétricos atualmente possam ser mais altos do que os dos veículos a gasolina e diesel, os EVs são mais fáceis de manter e mais baratos de operar. Essa combinação significa que os custos da bateria estão diminuindo rapidamente e, aparentemente, os veículos elétricos em breve se tornarão a opção mais barata em termos de custos totais, o que pode levar a um “ponto de inflexão” social em que esse veículos se tornam a opção preferida para a maioria dos consumidores.¹⁵⁷ Vários estudos analisaram os custos projetados de EVs e ICEVs para modelos representativos^{158 159 160 161 162} e concluíram que a paridade de custo de EVs¹⁶³ (custo total de propriedade) começa a ser alcançada no período de 2022-2027 na Europa, EUA e China. No entanto, dependendo da taxa de desconto e de outros fatores que influenciam a tomada de decisão, a paridade do preço de compra inicial pode ser uma consideração mais importante do que a paridade do custo total de propriedade para os consumidores.

A Figura 43 mostra os custos e preços de propriedade de EVs projetados, de acordo com a lei de Rogers-Wright combinada (sobre difusão e curvas de experiência), em comparação com ICEVs em todos os quatro principais mercados de automóveis até o horizonte político de 2050 para três segmentos diferentes, dadas as tendências observadas, incertezas existentes e assumindo que os quadros de política atuais são mantidos.

Os veículos elétricos a bateria (battery electric vehicles - BEVs) começam a atingir a paridade de custo entre 2022-2025 para todos os segmentos. Para a Europa, Estados Unidos e China, os carros na extremidade inferior da faixa de preço atingem a paridade de custo mais cedo, com preços e custos de propriedade para BEVs já mais baixos do que ICEVs na China. Para um carro do segmento média ou de luxo, os custos de propriedade dos BEVs podem atingir a paridade com os ICEVs entre 2023 e 2025 na China, Índia, Europa e Estados Unidos (Figura 43). No entanto, os veículos elétricos híbridos do tipo plug-in (plug-in hybrid electric vehicles - PHEVs) nunca atingem a paridade de custos com os ICEVs e estão ausentes na Índia. Isso ocorre porque os PHEVs são, em média, mais caros de possuir

do que os BEVs (consomem combustível e eletricidade) e custam mais para comprar do que os ICEVs (com bateria e transmissão elétrica, além de motor). Além disso, as reduções de custo para BEVs, que possuem baterias maiores que os PHEVs, são maiores.

É provável que a paridade do preço de compra dos BEVs seja alcançada depois da paridade do custo de propriedade e pode ocorrer no período de 2028-2035. Em alguns casos (por exemplo, o segmento de mercado de baixo custo na Índia), a paridade do preço de compra não é alcançada antes de 2040 com base nos dados existentes, porque os poucos modelos de BEVs disponíveis permanecem muito mais caros do que os ICEVs. Para convencer os consumidores a mudar para BEVs em mercados onde há pouca variedade, os subsídios que poderiam compensar com base no custo devem preencher lacunas potencialmente amplas entre os preços de alguns segmentos de mercado de veículos convencionais e os de alternativas escassas de carbono zero (consulte a Figura 44). Alternativamente, políticas do lado da oferta, como cotas de adoção de BEVs, podem aumentar a variedade de modelos no mercado e reduzir a necessidade de subsídios.

Nos principais mercados, a disponibilidade de mais modelos de EVs tornou esses veículos mais atraentes para os consumidores. Observamos rápido crescimento das vendas e um aumento na variedade de BEVs e PHEVs. Os BEVs ultrapassaram recentemente os PHEVs em seu crescimento, com o último estagnando em 2019-2021. Ressalte-se que as vendas de EVs não foram afetadas pela pandemia de Covid-19. Enquanto as vendas de EVs ainda estão atrasadas em países em desenvolvimento, como a Índia, onde apenas alguns modelos estão disponíveis (Figura 45), as vendas de EVs de duas e três rodas têm aumentado consistentemente. A variedade de EVs precisará continuar a aumentar em todos os mercados para garantir uma transição econômica bem-sucedida. A segmentação de incentivos de compra de EVs em segmentos populares de ICEVs, onde faltam modelos de EVs, pode ajudar a aumentar a variedade de EVs disponíveis. No caso em que há poucos EVs disponíveis no mercado, também pode ser útil desenvolver uma política comercial que leve ao aumento das importações ou fortaleça a cadeia de fornecimento de EVs no mercado interno.

Políticas individuais para dar suporte à adoção de EVs

Embora os EVs estejam próximos de alcançar a paridade de custo, isso não garante uma transição para a mobilidade elétrica compatível com as metas econômicas, industriais ou de mudança climática de um país. Analisamos a eficácia de quatro dos principais instrumentos de política para apoiar a adoção dos elétricos: subsídio, imposto sobre veículos, regulação da eficiência veicular e cotas para produção e adoção. Comparamos os resultados em termos de custo-benefício da adoção de EV; custo-eficácia da redução de emissões; e redução de custo de EVs alcançada ao longo do período. Também comparamos os impactos macroeconômicos dos cenários de transição rápida e lenta, em termos de consumo de energia em toda a economia, PIB, importações e emprego.

Para fins de comparação, definimos instrumentos de política individuais da seguinte forma:

- **Subsídios:** “Subsídio atual” é um subsídio à compra de EV em seu nível atual num dado mercado. “Paridade de custo de subsídio” é um subsídio de compra de EV definido no nível necessário para atingir a paridade de custo de propriedade com um veículo ICEV equivalente no ano de 2022. “Subsídio alto” é um subsídio de 150% do nível de referência/2020. “Subsídio muito alto” é um subsídio de 200% do nível de referência/2020.
- **Impostos:** “Paridade no custo do imposto” (*tax cost parity*) é um tributo sobre veículos ICEV definido no nível necessário para atingir a paridade de custo de propriedade com um EV equivalente no mercado especificado no ano de 2022. “Imposto alto” (*tax high*) é um imposto de 150% da linha de base/nível 2020. “Imposto muito alto” (*tax very high*) é um imposto de 200% do nível de referência/2020.
- **Regulações:** “Regulação lenta” (*regulation slow*) é uma regulação de eficiência que exige que a intensidade de carbono dos veículos novos, medida em emissões de carbono por quilômetro, reduza linearmente de seu nível em 2022 para 50% desse nível até 2035. “Regulação rápida” (*regulation fast*) exige a intensidade de carbono de novos veículos para reduzir linearmente de seu nível em 2022 para zero em 2035.
- **Cotas:** “Cotas lentas” (*mandate slow*) exigem que 50% dos novos veículos tenham emissão zero até 2035. E “Cotas rápidas” (*mandate fast*) exigem

que todos os novos veículos tenham emissão zero até 2035.

As Figuras 46 e 47 comparam a eficácia e o custo desses instrumentos políticos individuais para promover a adoção de EVs na Europa, EUA, China e Índia.

Os resultados indicam:

- **Em termos de pura eficácia na condução da transição para veículos elétricos, as cotas tecnológicas são a política mais eficaz em todas as quatro regiões.** Isso não é surpreendente: essas exigências são desenhadas para garantir uma mudança para a nova tecnologia. As regulações mirando a eficiência, mesmo quando têm rigor equivalente (exigindo uma mudança total das vendas de veículos novos para tecnologia de emissão zero na mesma data), podem resultar em uma mudança menor para veículos elétricos na estrada, porque pelo menos por algum período eles podem ser cumpridos através da venda de automóveis a gasolina ou a diesel mais eficientes.
- **Subsídios e impostos, quando usados sem o apoio de regulações ou cotas, são relativamente ineficazes.** Aumentar o nível de subsídios e impostos além do necessário para atingir a paridade de custos entre veículos EVs e ICE tem relativamente pouco efeito adicional sobre a adoção. Isso ocorre porque o imposto ou o subsídio no nível de paridade de custo não é necessariamente suficiente para muitos consumidores escolherem os EVs, especialmente na ausência do que é percebido como modelos comparáveis ou número suficiente de estações de carregamento. Sem regulações ou cotas que impulsionem o ritmo da difusão, poucos consumidores estão cientes ou têm acesso às novas tecnologias e, portanto, poucos aproveitarão o incentivo fiscal até que os níveis de difusão sejam maiores
- **As regulações são geralmente mais econômicas do que os incentivos financeiros para conduzir a transição para veículos elétricos.** Isso se deve a uma combinação de fatores. Regulações e cotas promovem uma mudança maior para EVs, agindo de forma decisiva no fornecimento e impondo requisitos rígidos que os fabricantes devem atender. Em contraste, os incentivos financeiros – que se concentram em reduzir as diferenças de custo – encorajam uma mudança de comportamento dos consumidores, mas não a exigem, e as diversas preferências dos consumidores significam que alguns não serão

¹⁵⁷ Sharpe, S. and Lenton, T. M. (2021). Upward-Scaling Tipping Cascades to Meet Climate Goals: Plausible Grounds for Hope. *Climate Policy* 21: 421–433. <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1870097>

¹⁵⁸ Bloomberg NEF. (2021) Hitting the EV Inflection Point.

¹⁵⁹ Lutsey, N. et al. (2021). Evaluating Electric Vehicle Costs and Benefits in China in the 2020-2035 Time Frame. International Council on Clean Transportation (ICCT).

¹⁶⁰ Lutsey, N. et al. (2021). Evaluating Electric Vehicle Costs and Benefits in China in the 2020-2035 Time Frame. International Council on Clean Transportation (ICCT).

¹⁶¹ Bloomberg NEF. (2021) Hitting the EV Inflection Point.

¹⁶² Lam, A. and Mercure, J-F (2022). Evidence for a Global Electric Vehicle Tipping Point. GSI Working paper series number 2022/01. https://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/globalssystemsinstitute/documents/Lam_et_al_Evidence_for_a_global_EV_TP.pdf

¹⁶³ A paridade de custo não ocorre para todos os modelos de EVs ao mesmo tempo porque isso depende do tamanho e da especificação do modelo. A “paridade de custo inicial” é acionada quando a paridade de custo é alcançada pela primeira vez para alguns modelos de veículos, em um determinado mercado.

persuadidos. Ao mesmo tempo, o custo das regulações e das cotas tecnológicas (mais veículos comprados com preço de compra mais alto) é compensado pelos custos operacionais mais baixos de EVs e veículos ICE mais eficientes. Na China, o custo da regulação é negativo porque os custos de propriedade dos EVs já são menores do que os dos ICEVs. Uma exceção à regra ocorre na Europa, onde a regulação já existe há algum tempo e o mercado de EVs é relativamente maduro e variado. Nesse contexto, os subsídios podem ser rentáveis.

- **Em todos os casos, os impostos são muito menos rentáveis do que os subsídios.** Isso ocorre porque, para obter o mesmo efeito de paridade de custos entre EVs e ICEVs, o subsídio a EVs só precisa ser aplicado à pequena parcela do mercado atualmente representada pelas vendas de EVs, enquanto um imposto deve ser aplicado à parcela muito maior do mercado formado pelas vendas dos ICEVs.

A Figura 48 compara a relação custo-benefício das políticas em termos de um resultado diferente: redução de emissões. O padrão geral é semelhante. Regulações e cotas geralmente alcançam reduções cumulativas de emissões ao longo do período de forma mais econômica do que incentivos financeiros. Os subsídios alcançam reduções de emissões de forma mais econômica do que os impostos.

Quer o objetivo seja a adoção de EVs ou a redução de emissões, concluímos que uma transição rápida é mais econômica do que uma transição lenta (Figuras 47 e 48). Como o sistema é altamente *path-dependent*, um cenário de transição rápida no curto prazo leva a uma maior difusão de EVs no longo prazo e, portanto, atinge significativamente mais do que um cenário de transição mais lento em termos de adoção de EVs e de reduções de emissões de CO₂. Como os EVs se tornam relativamente mais baratos de operar do que os ICEVs no início do período, uma transição mais rápida resulta em maior economia geral de custos.

A Figura 49 mostra a eficácia das políticas na redução dos custos dos EVs ao longo do tempo. Isso acontece porque a adoção dessas tecnologias impulsiona o aprendizado e as economias de escala. As políticas regulatórias são mais eficazes do que os incentivos financeiros porque são mais eficazes no aumento da adoção de EVs. Em todos os casos, cotas envolvendo EVs geram as maiores reduções de custo porque atingem a maior taxa de adoção cumulativa de EVs (como mostrado na Figura 45).

As Figuras 50 e 51 ilustram o consumo cumulativo de energia e a redução de emissões de CO₂ em diferentes cenários políticos. No geral, nossos resultados indicam que as regulações e as regras compulsórias são significativamente mais eficazes na redução das emissões de CO₂ do que os incentivos financeiros e também são mais eficazes na redução do consumo de energia.

Pacotes de políticas para dar suporte à adoção de EVs

Na realidade, políticas focadas na adoção de tecnologias raramente são usadas isoladamente. Normalmente, há vantagem em implementar diferentes políticas simultaneamente. No entanto, a eficácia dos pacotes de políticas pode variar bastante.

A Figura 52 mostra que a eficácia combinada de duas políticas geralmente não é igual à soma de suas eficácias individuais, mas pode ser menor (efeito de compensação) ou maior (efeito de reforço). Os efeitos de reforço mais fortes são observados quando as cotas envolvendo EVs são usadas em conjunto com as regulações de eficiência e com impostos rodoviários. Os *trade-offs* são observados quando as regulações de eficiência são combinadas com impostos rodoviários ou impostos sobre combustíveis: essas combinações alcançam menos do que a soma de suas partes.

A Figura 53 mostra o efeito de combinar mais políticas em um pacote, com base em cenários simulados de composições da frota nos quatro principais mercados. A trajetória atual (A) indica para onde os mercados estão indo sem políticas adicionais. (B) A adição de impostos rodoviários e de veículos mais rigorosos e subsídios para veículos elétricos tem impactos limitados. (C) As regulações de economia de combustível aceleram as reduções de emissões de veículos convencionais, mas têm impactos limitados na difusão de EVs. (D) Adicionar cotas para ZEVs amplia substancialmente o efeito das outras políticas, pois expande seu efeito entre os usuários de veículos. No cenário de trajetória atual (Coluna A), assumimos que não há novos incentivos políticos em vigor. Os resultados mostram que a transição para 100% de vendas de EVs até 2035 não acontecerá sem uma política sustentada.

Os incentivos financeiros que alcançam a paridade de custos entre os EVs e os ICEVs podem ajudar, conforme discutido acima. Demonstramos que é possível conseguir isso sem colocar pressão financeira sobre o governo, considerando um *feebate* neutro em termos de receita. A Tabela 10 mostra os subsídios sobre BEVs necessários para quebrar a paridade de custos com diferentes segmentos de ICEVs nos principais mercados

em 2023. Os subsídios são financiados por meio de impostos aplicados aos ICEVs no local de compra. Com a gama de subsídios para carros movidos a combustível fóssil listados na Tabela 10, a estrutura de incentivo pode criar um mecanismo de receita neutra para financiar subsídios de BEVs que preenchem as lacunas de custo entre ICEVs e EVs em 2023 na Europa, EUA e Índia. O governo chinês não está mais fornecendo subsídios aos compradores de veículos elétricos e, portanto, o subsídio de veículos elétricos na China não é considerado aqui. Como os EVs representam atualmente apenas uma pequena parcela do mercado, um pequeno imposto sobre cada veículo movido a combustível fóssil vendido é suficiente para financiar um subsídio alto para cada novo elétrico no mercado.

Descobrimos que a adoção de subsídios para quebrar a paridade de custos com ICEVs não é suficiente para tornar todos os veículos novos com emissão zero até 2035 pelas razões expostas acima (Figura 53, Coluna B). A solução do problema de fornecimento de BEVs pode ser acelerada adotando-se cotas para ZEVs ou regulações de eficiência mais duras. Vários estudos existentes^{164 165 166} concluem que combinações bem desenhadas de instrumentos de política podem levar a uma taxa de transição maior do que a alcançada por meio da aplicação de qualquer instrumento individual. Em particular, há um efeito de reforço entre as cotas tecnológicas envolvendo ZEVs e outros incentivos financeiros (ou seja, a presença de duas políticas oferece um maior benefício de mitigação de CO₂ do que a soma da eficácia de qualquer uma das políticas sozinha).¹⁶⁷

Dado que há um efeito de reforço entre as exigências envolvendo cotas para a produção e a venda de ZEVs e outros incentivos financeiros, adicionamos sequencialmente subsídios a EVs, regulações e cotas para ZEVs nos painéis BCD na Figura 53. Adicionar as cotas, que estabelecem que fabricantes devem atingir determinadas participações no fornecimento de ZEVs, chegando gradualmente a 100%, garante, em conjunto com as outras políticas, que se atinja o patamar de zero emissões até 2050 ou antes.

Comparamos os resultados de um aperto gradual na regulação de eficiência que leva a emissões zero com as cotas para ZEVs que levam a 100% das vendas de BEVs em 2035. Conforme mostrado na Figura 54, as cotas para ZEVs levam a uma difusão mais rápida de

BEVs do que um aperto gradual das regulações de economia de combustível. Isso ocorre porque o padrão de economia de combustível é tecnologicamente neutro e permite a difusão de veículos de baixa emissão, como veículos elétricos híbridos (HEVs) e PHEVs. Em particular, em países onde as frotas de PHEVs e HEVs são muito maiores do que as de BEVs no cenário de trajetória atual (por exemplo, EUA e Índia), uma eliminação gradual de veículos convencionais representa a oportunidade para a difusão de PHEVs e HEVs, devido à forte dependência da trajetória da difusão tecnológica. Enquanto isso, as cotas para ZEVs, exigindo que as montadoras produzam e vendam um certo número de BEVs, é uma medida mais direta para incentivar uma rápida difusão de BEVs. Dado que os BEVs não têm emissões de escapamento, mais reduções de emissões podem ser alcançadas por meio dessas exigências quando elas são combinadas com um aperto gradual da regulação da economia de combustível durante o período simulado.

Coordenação internacional traz paridade de custo de BEVs

A Breakthrough Agenda, acordada por 45 países na COP26 em Glasgow, visa a que os países coordenem suas ações para acelerar o desenvolvimento e a adoção de tecnologias de energia limpa, a fim de reduzir seus custos mais rapidamente. Mesmo com sucessos recentes na adoção de EVs nos principais mercados, alcançar uma trajetória consistente com as metas climáticas requer uma forte ação política de todos os países.

A Figura 55 mostra as diferenças de custo entre BEVs e ICEVs em diferentes cenários de cooperação internacional pelos principais mercados. Supor que nenhuma região implemente políticas fortes para que todos os veículos novos sejam de emissão zero induz a taxa mais lenta de reduções de custo de BEVs. A adoção de instrumentos de política que alcancem 100% dos veículos novos com emissão zero até 2035 nos principais mercados (Europa, EUA, China) antecipa o ano em que a paridade de custo é alcançada em dois a cinco anos na Europa, nos EUA e China, aumentando significativamente as chances de cumprimento das metas climáticas. Nesta simulação, assumimos implicitamente que a capacidade de produção de baterias e EVs é suficiente para atender à demanda de elétricos decorrente dessa política.

¹⁶⁴ Axsen, J. et al. (2020). Crafting strong, integrated policy mixes for deep CO₂ mitigation in road transport. *Nature Climate Change* 10: 809–818. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0877-y>

¹⁶⁵ Bhardwaj, C. et al. (2020). Why have Multiple Climate Policies for Light-Duty Vehicles? Policy mix rationales, interactions and research gaps. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 135: 309–326. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.03.011>

¹⁶⁶ Lam, A and Mercure, J.-F. (2021). Which Policy Mixes are Best for Decarbonising Passenger cars? Simulating Interactions Among taxes, Subsidies and Regulations for the United Kingdom, the United States, Japan, China, and India. *Energy Research and Social Science* 75. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101951>

¹⁶⁷ Lam, A and Mercure, J.-F. (2021). Which policy mixes are best for decarbonising passenger cars? Simulating interactions among taxes, subsidies and regulations for the United Kingdom, the United States, Japan, China, and India. *Energy Research and Social Science* 75. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101951>

Enquanto isso, a adoção de BEVs no resto do mundo pode permitir uma maior expansão da produção e reduzir ainda mais os custos nos principais mercados. Esse ganho de coordenação justifica uma ação forte e coordenada entre os principais mercados, além de apoio financeiro e técnico para promover a implantação de BEVs em países em desenvolvimento. Devido aos retornos decrescentes nas reduções de preços, o sucesso inicial da política tem um efeito maior na aceleração das reduções de custos. Isso sugere que a ação política na Europa, China e EUA pode ser particularmente importante para permitir a transição para ZEVs no resto do mundo.

Uma transição rápida para ZEVs pode levar a impactos macroeconômicos positivos, embora isso dependa do contexto

Usamos o modelo E3ME para investigar os efeitos da transição para EVs e seu ritmo em vários indicadores macroeconômicos. A Figura 56 mostra os impactos de uma transição lenta e rápida em comparação com o cenário de referência onde tal transição não ocorre. A linha superior exhibe as diferenças em toda a economia na demanda de energia primária de ambos os cenários em comparação com a referência. A eletrificação da frota de veículos leva a uma grande redução da demanda por petróleo, que é maior no cenário de transição rápida. Na China, a demanda de petróleo em 2035 cai 8% na transição lenta e 12% na transição rápida, em comparação com o cenário de referência em 2035. Na Índia, os números equivalentes são 4% e 8%. No entanto, a transição também requer eletricidade adicional, o que demanda várias fontes de energia primária. Em todas as regiões observamos um aumento na demanda de energia elétrica, que geralmente inclui um mix de energia renovável e combustíveis fósseis, dependendo da matriz energética local. Isso se reflete nas emissões do setor de energia, que aumentam na Índia e nos EUA; no entanto, isso é mais do que compensado pelas reduções de emissões nos setores de transporte e de fabricação de combustível (contido no grupo “outras energias”). A razão para isso é que as usinas elétricas de combustível fóssil e a transmissão de eletricidade juntas são geralmente mais eficientes do que os motores de combustão interna dos carros na geração de movimento.

Olhando para o PIB, notamos histórias sutilmente diferentes para cada país. A Índia e a UE mostram crescimento adicional devido à transição para veículos elétricos, e o aumento é maior no cenário de transição

rápida do que no de transição lenta (em US\$ 126 bilhões em 2020 para a Índia e em US\$ 60 bilhões em 2020 para a UE, em comparação com cenário de referência em 2050). Em contraste, os EUA e particularmente a China apresentam resultados de PIB mais baixos quando passam por uma transição rápida em comparação com a referência. A China é a única região com impactos negativos no PIB também no cenário de transição lenta. Esses resultados são impulsionados por uma combinação de mudanças nos gastos do consumidor, investimentos industriais e exportações líquidas. Os gastos do consumidor são afetados pelo emprego, salários e preços. Na China, o modelo mostra uma grande queda no emprego nos setores de combustíveis fósseis e mineração (particularmente petróleo e gás), o que suprime os gastos do consumidor. Os gastos mais baixos do consumidor levam a uma demanda mais baixa e, portanto, desaceleram os investimentos, enquanto as exportações líquidas também caem, apesar de uma interação de menos importações de petróleo bruto e menos exportações de derivados de petróleo refinados. A história é o oposto na Índia, que depende muito mais das importações de petróleo bruto do que os outros países e, portanto, um declínio na demanda de petróleo leva à melhoria da balança comercial (expressa em exportações líquidas), deixando a renda para gastar internamente, com consequentes benefícios para o PIB e empregos. Os EUA são grandes produtores de petróleo bruto e produtos refinados e veem principalmente impactos negativos devido à redução das exportações de petróleo bruto. Por último, a UE não é um grande produtor de petróleo bruto e tem capacidades consideráveis de refino de petróleo para satisfazer a demanda no seu próprio mercado. Assim, os impactos comerciais negativos são menores. Em todos os países e cenários, a largura de banda dos impactos relativos do PIB é relativamente pequena, variando de aproximadamente -0,1% a +0,6%.

Uma limitação importante do modelo é que ele não diferencia entre atividade econômica e empregos gerados pela fabricação de EVs e aqueles gerados pela fabricação de ICEVs. Também não determina para cada país se os EVs são importados ou fabricados internamente. Isso significa que ele não captura os ganhos ou as perdas econômicas que podem surgir quando um país aumenta ou diminui sua participação nas vendas globais de veículos à medida que o setor faz a transição dos combustíveis fósseis para a tecnologia EV. Isso pode levar a uma subavaliação dos benefícios econômicos de políticas que estimulam o crescimento da oferta e demanda de veículos elétricos no mercado doméstico de um país.

Conclusão

Com a queda rápida dos custos das baterias para EVs, a paridade de custos com veículos movidos a combustíveis fósseis pode ser alcançada em muitos países em um futuro próximo. Uma vez ultrapassada a paridade de custos, os elétricos podem proporcionar economias substanciais de custos para a economia. Os governos têm interesse em identificar as políticas que podem maximizar essas economias.

Subsídios a veículos elétricos que preencham as lacunas de custo entre EVs e ICEVs pode tornar aqueles tipos de veículos mais atraentes para os consumidores e ser neutro em termos de receita com apenas um pequeno imposto sobre os movidos

a combustão. No entanto, os incentivos financeiros por si só não são suficientes para conduzir a uma transição rápida quando as preferências individuais variam e as escolhas são limitadas. Medidas políticas, como cotas para ZEVs e regulações de eficiência que aumentam a oferta de ZEVs no mercado, podem ser mais econômicas individualmente e ser usadas em conjunto com incentivos financeiros para criar pacotes de políticas altamente eficazes. A transição para EVs pode ser ainda mais acelerada por meio de coordenação internacional. A consequência macroeconômica mais significativa da transição pode ser a redução do consumo de petróleo, que pode afetar positivamente ou negativamente os países, dependendo de sua condição de importador ou exportador.

Tabela 10: Abordagem de receita neutra para apoiar a transição para EVs. a) Subsídio de EVs necessário para quebrar a paridade de custo com ICEVs. b) Níveis de impostos neutros em receita nos principais mercados em 2023.

A. Subsídio exigido por veículo em 2023 (USD)	Europa	EUA	Índia
EV de baixo custo	0	1900	1000
EV médio	1600	3000	0
EV de luxo	4800	4500	NA
B. Imposto neutro de receita por veículo em 2023	Europa	EUA	Índia
ICEV de baixo custo	0	90	7
ICEV médio	160	200	0
ICEV de luxo	310	260	NA

Figura 43: Trajetória dos custos totais de propriedade (linhas tracejadas) e preços (linhas sólidas) de BEVs/PHEVs/ICEVs (mediana e taxas de aprendizagem com faixa de confiança de 95%).¹⁶⁸

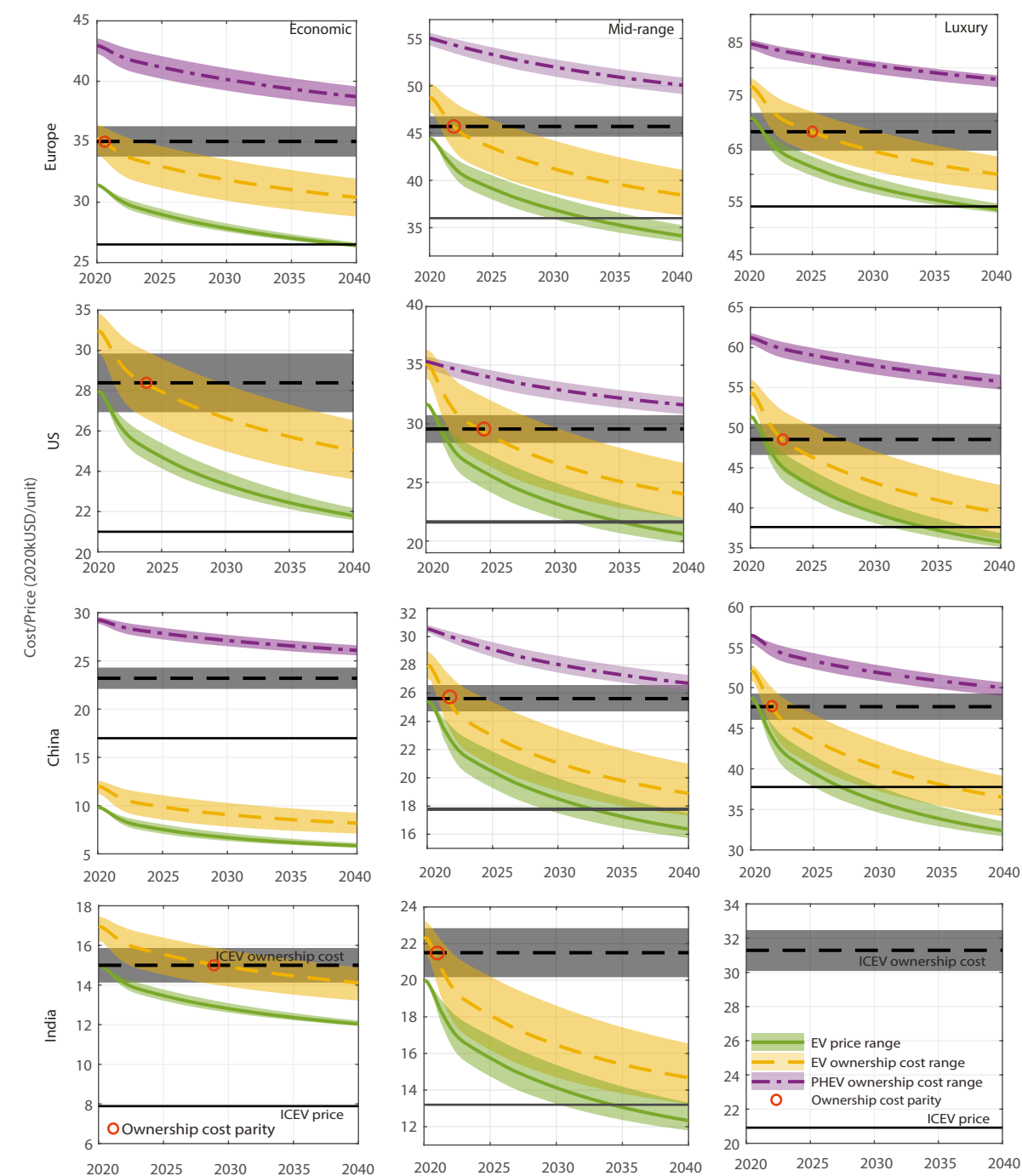
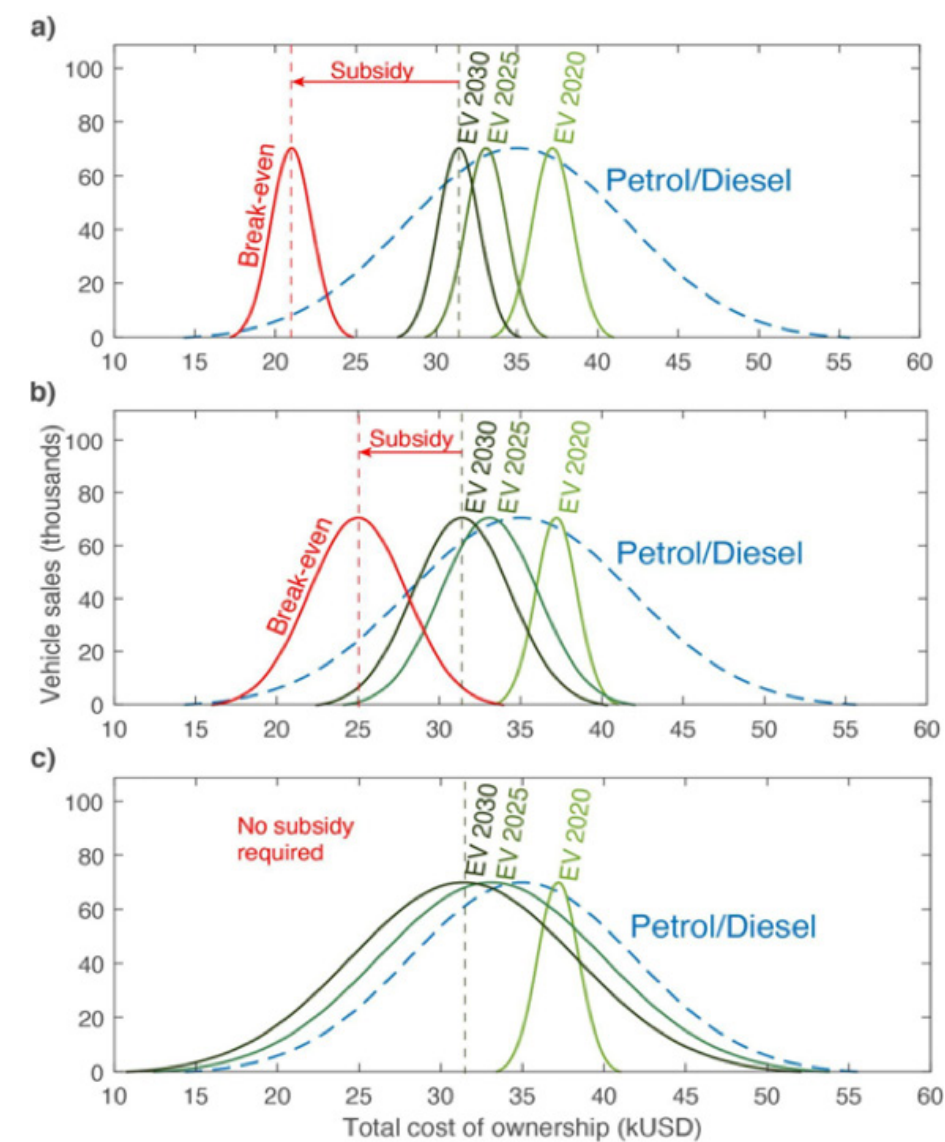


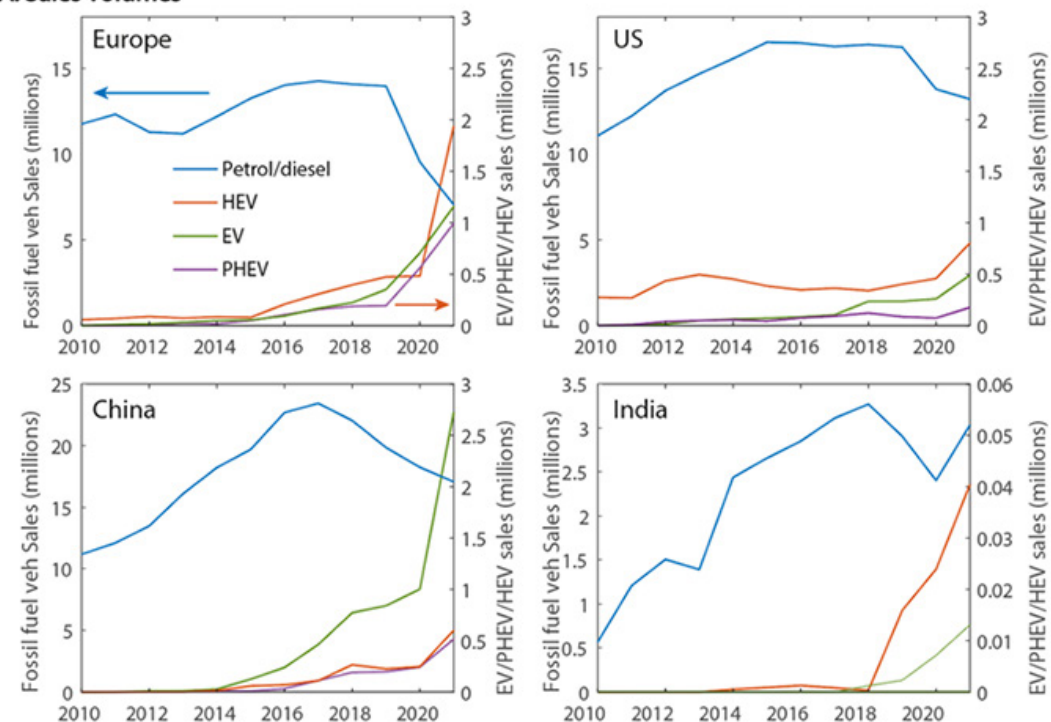
Figura 44: Relação entre a variedade de modelos e o subsídio de equilíbrio em 2025 e em 2030. A curva vermelha representa o subsídio necessário para um EV custar menos do que a maioria dos modelos de ICEVs comparáveis em todas as categorias de preço no mercado. Esse subsídio de equilíbrio reduz à medida que os custos diminuem com o aumento da diversidade, para (a) variedade de BEVs constante, (b) variedade de BEVs duplicada e (c) variedade de BEVs correspondente à variedade atual de veículos a gasolina/diesel. Em (a), o subsídio necessário para reduzir a diferença de custo é maior do que em (b) e (c) porque há um número significativo de modelos de ICEVs mais baratos no mercado. Quando a diversidade de EVs atinge a dos ICEVs (em c), torna-se possível ao consumidor adquirir um modelo de EV comparável sem subsídios.



¹⁶⁸ Lam, A., Mercure, J-F (2022). Evidence for a global electric vehicle tipping point. GSI Working paper series number 2022/01. https://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/globalsystemsinsitute/documents/Lam_et_al_Evidence_for_a_global_EV_TP.pdf

Figura 45: Evolução dos mercados e preços de veículos. Série temporal de distribuição de preços para veículos convencionais a gasolina/diesel, BEVs e PHEVs na Europa, EUA, China e Índia.¹⁶⁹

A. Sales volumes



B. Market variety

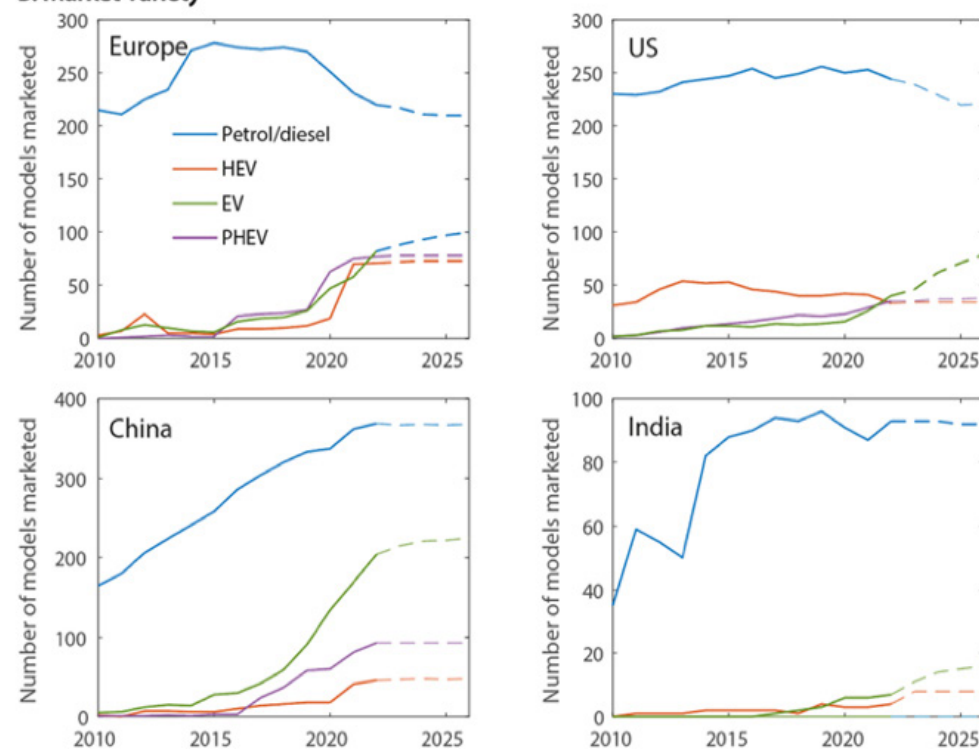
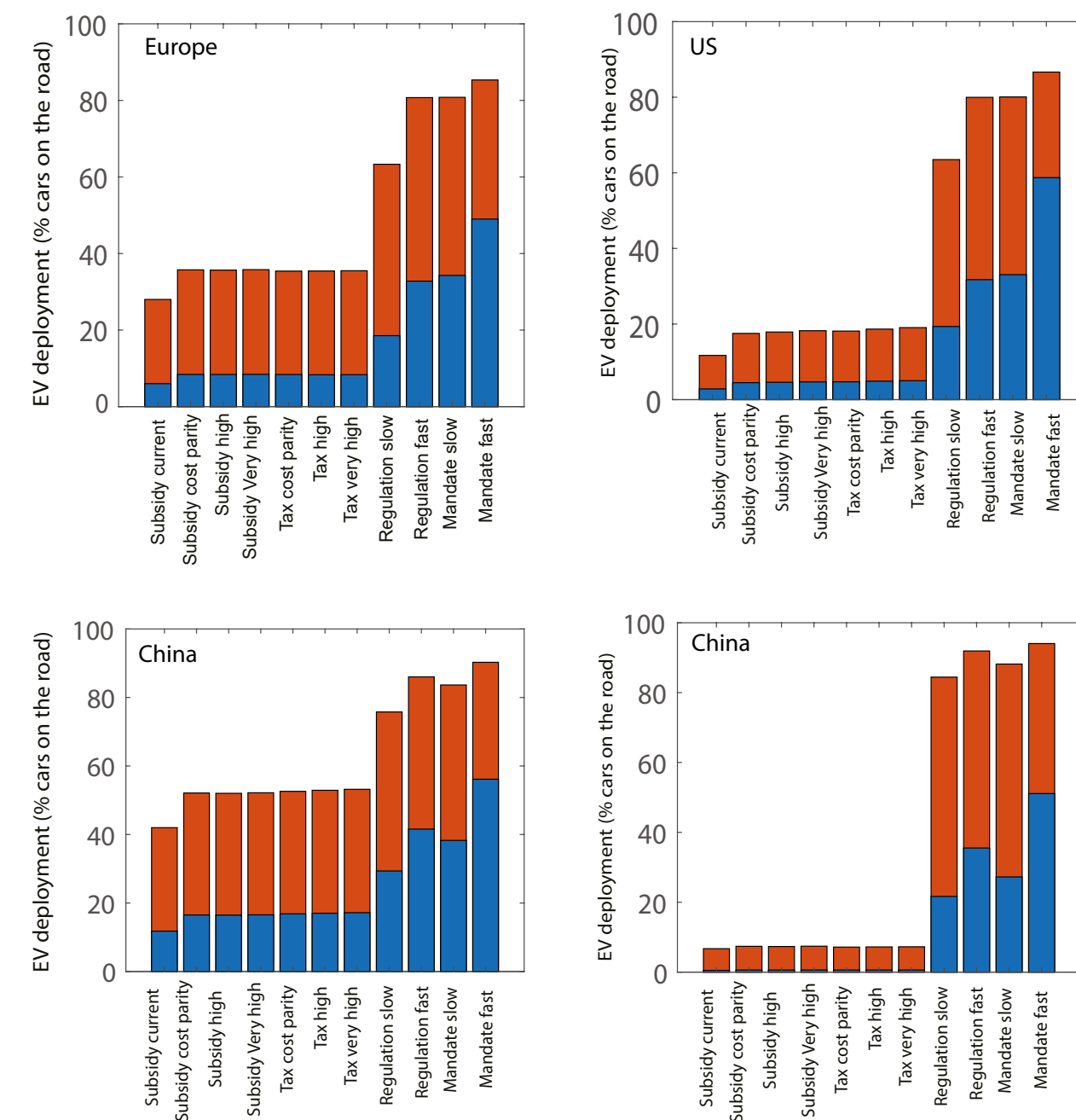


Figura 46: Adoção de EVs em 2035 e 2050 nos principais mercados como resultado de diferentes políticas utilizadas individualmente.



¹⁶⁹ Lam, A., Mercure, J-F (2022). Evidence for a Global Electric Vehicle Tipping Point. GSI Working paper series number 2022/01. https://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/globalssystemsinstitute/documents/Lam_et_al_Evidence_for_a_global_EV_TP.pdf

Figura 47: O custo da implantação de EVs como resultado de diferentes políticas usadas individualmente.

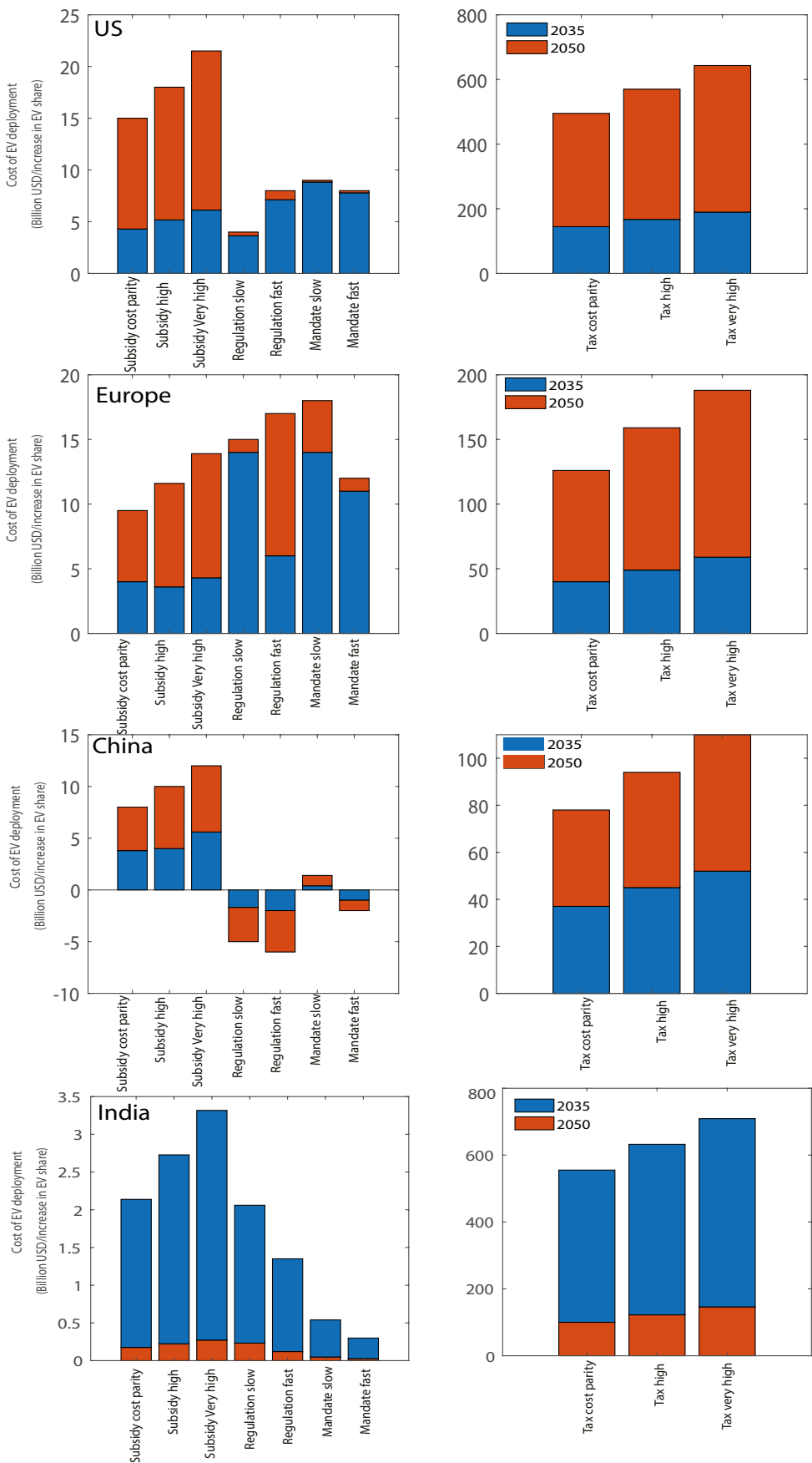


Figura 48: Custo da redução de emissões de CO2 sob diferentes premissas políticas.

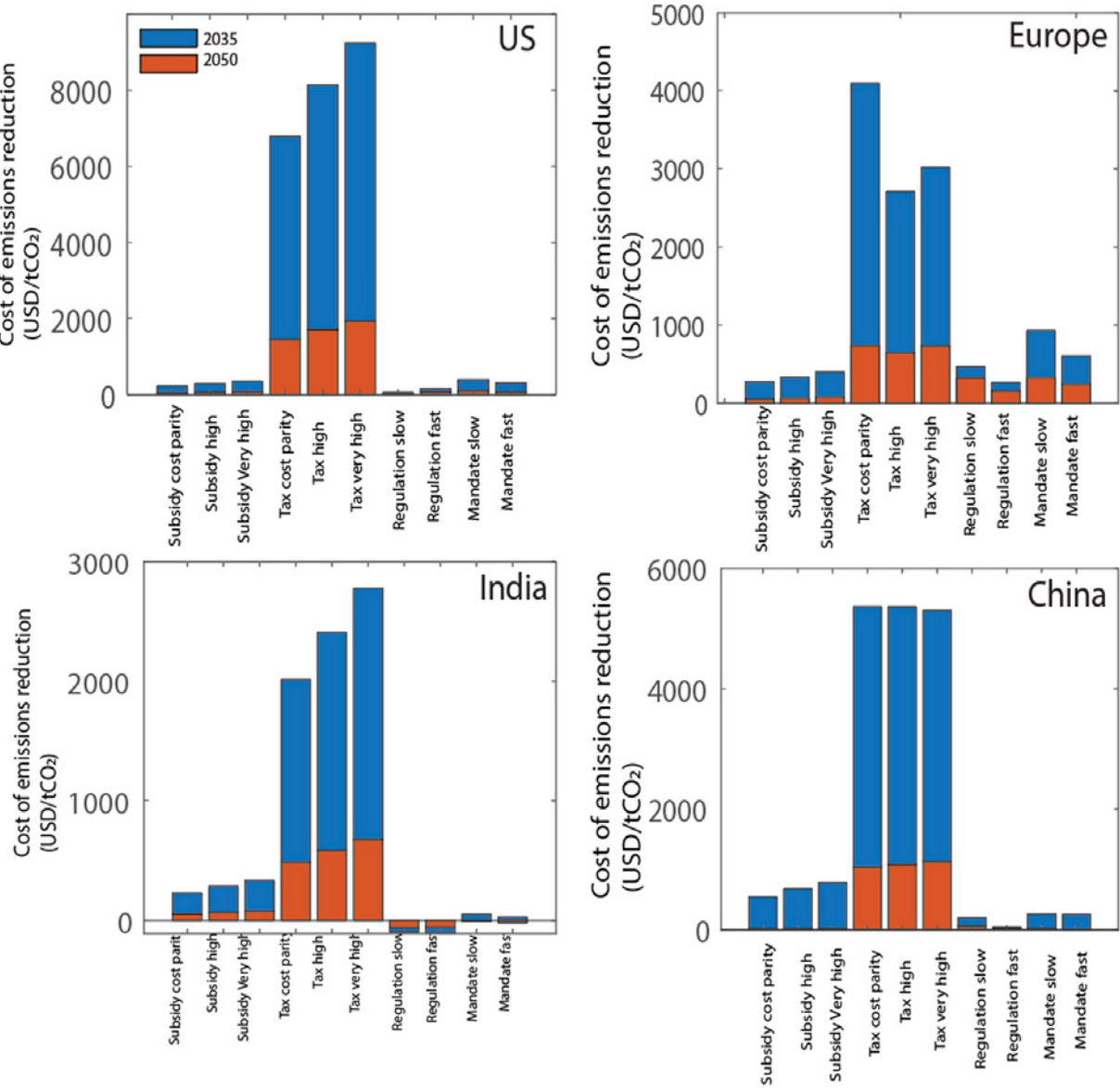


Figura 49: Custo do EVs de referência sob diferentes pressupostos de política.

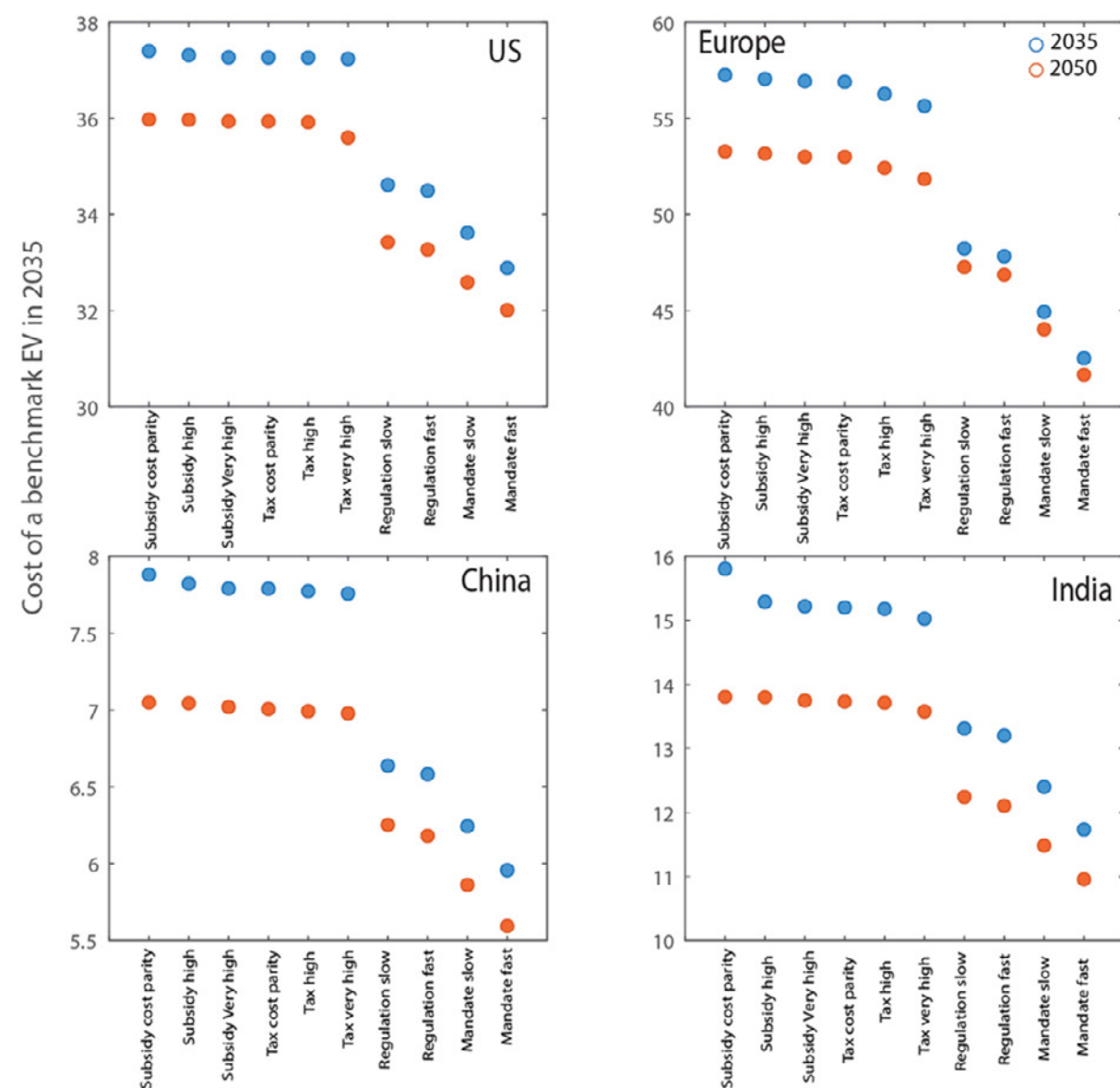


Figura 50: Consumo cumulativo de energia sob diferentes pressupostos de política.

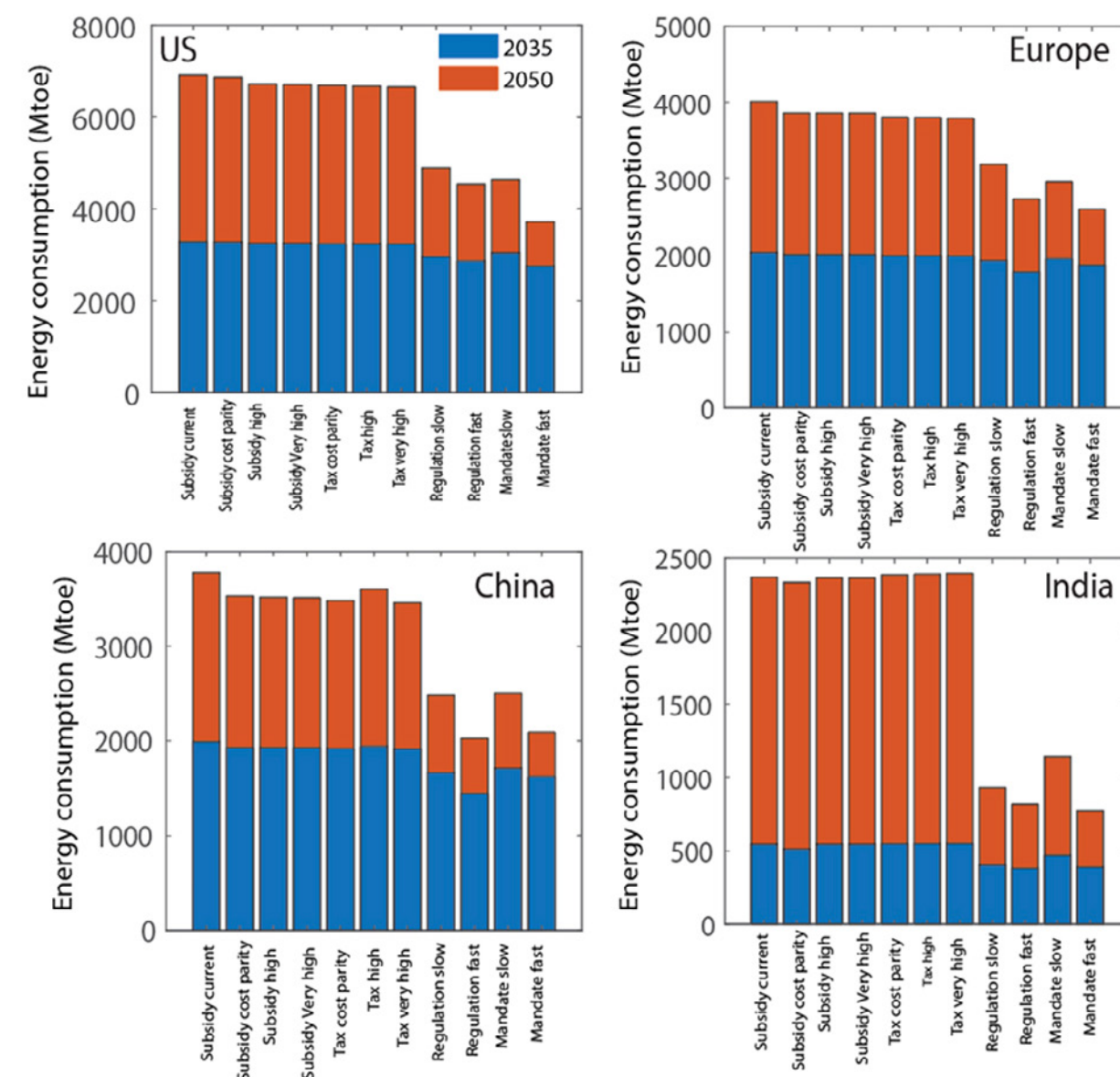


Figura 51: Reduções cumulativas de emissões de CO2 sob diferentes premissas políticas.

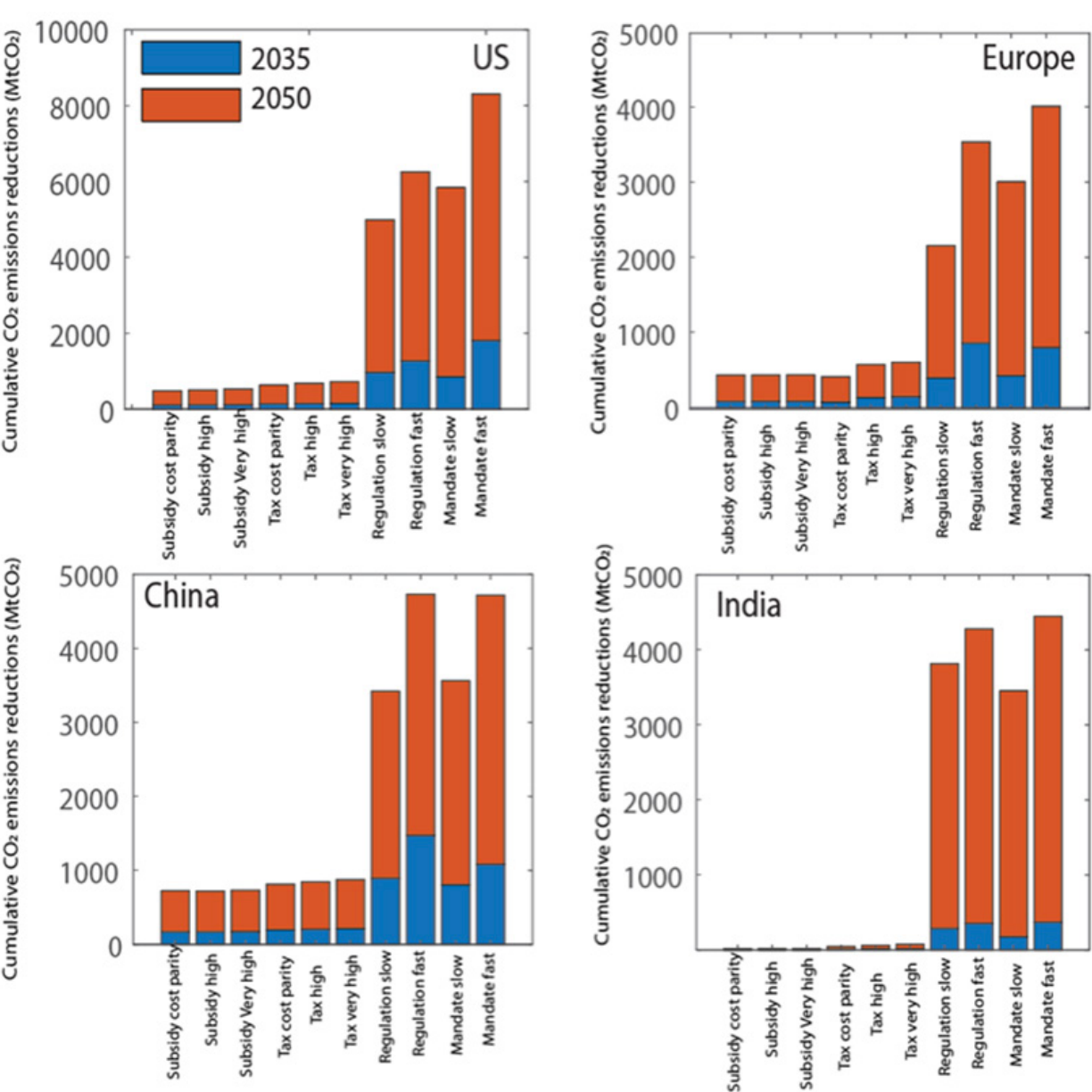
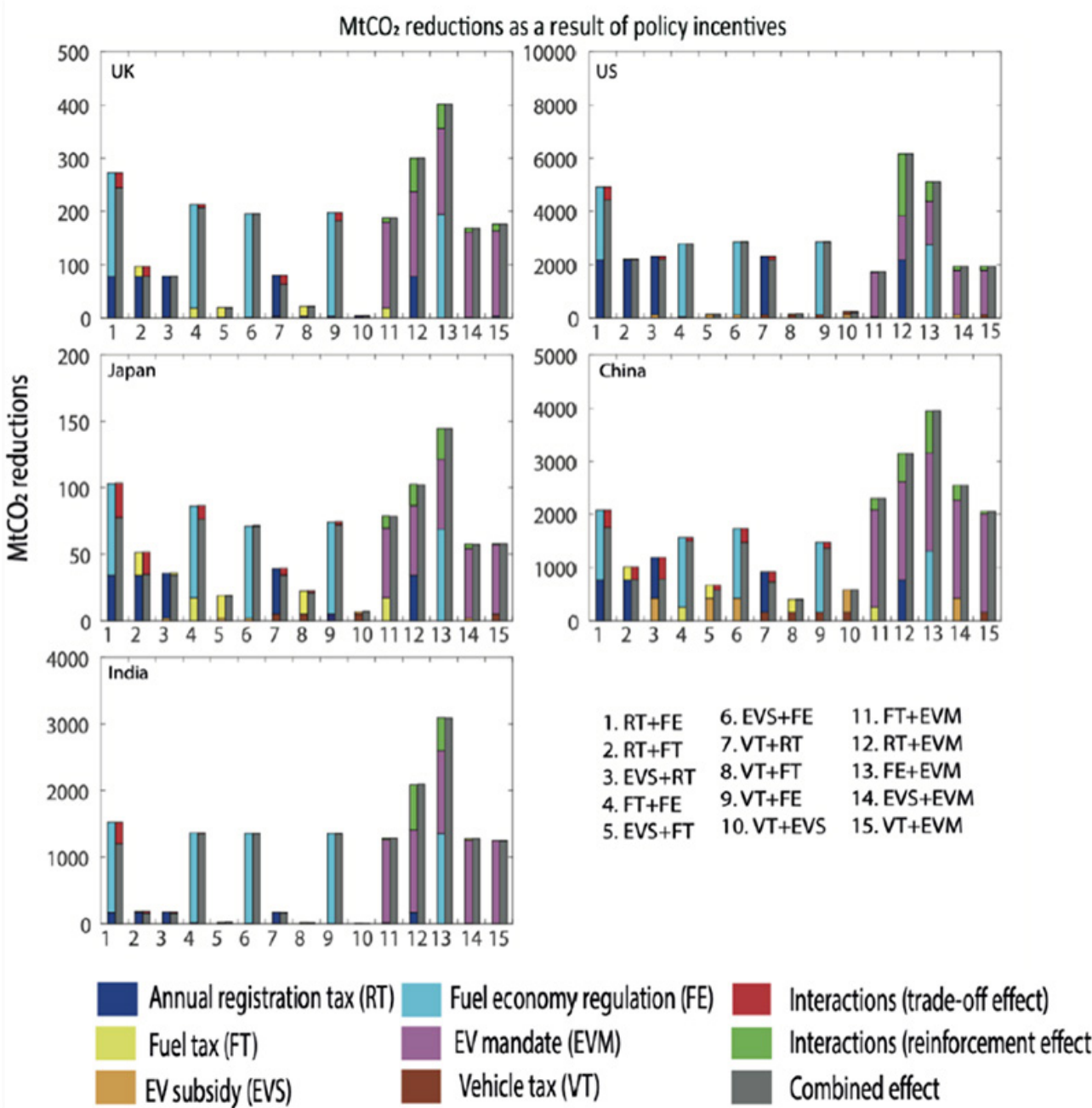


Figura 52: Cenários de políticas para alcançar a descarbonização rápida do transporte em diferentes cenários de políticas.¹⁷⁰



¹⁷⁰ Lam, A. and Mercure, J-F. (2021). Which Policy Mixes are Best for Decarbonising Passenger cars? Simulating interactions among taxes, subsidies and regulations for the United Kingdom, the United States, Japan, China, and India. Energy Research and Social Science 75. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101951>

Figura 53: Simulações de cenários de política de EVs abrangentes para todos os principais mercados de automóveis. A trajetória atual (A) indica para onde os mercados estão indo sem políticas adicionais. (B) A adição de impostos rodoviários e de veículos mais rigorosos e subsídios para veículos elétricos tem impactos limitados. (C) As regulações de economia de combustível aceleram as reduções de emissões de veículos convencionais, mas têm impactos limitados na difusão de EVs. (D) Adicionar cotas para ZEVs amplia substancialmente o efeito das outras políticas, pois expande seu efeito entre os usuários de veículos.¹⁷¹

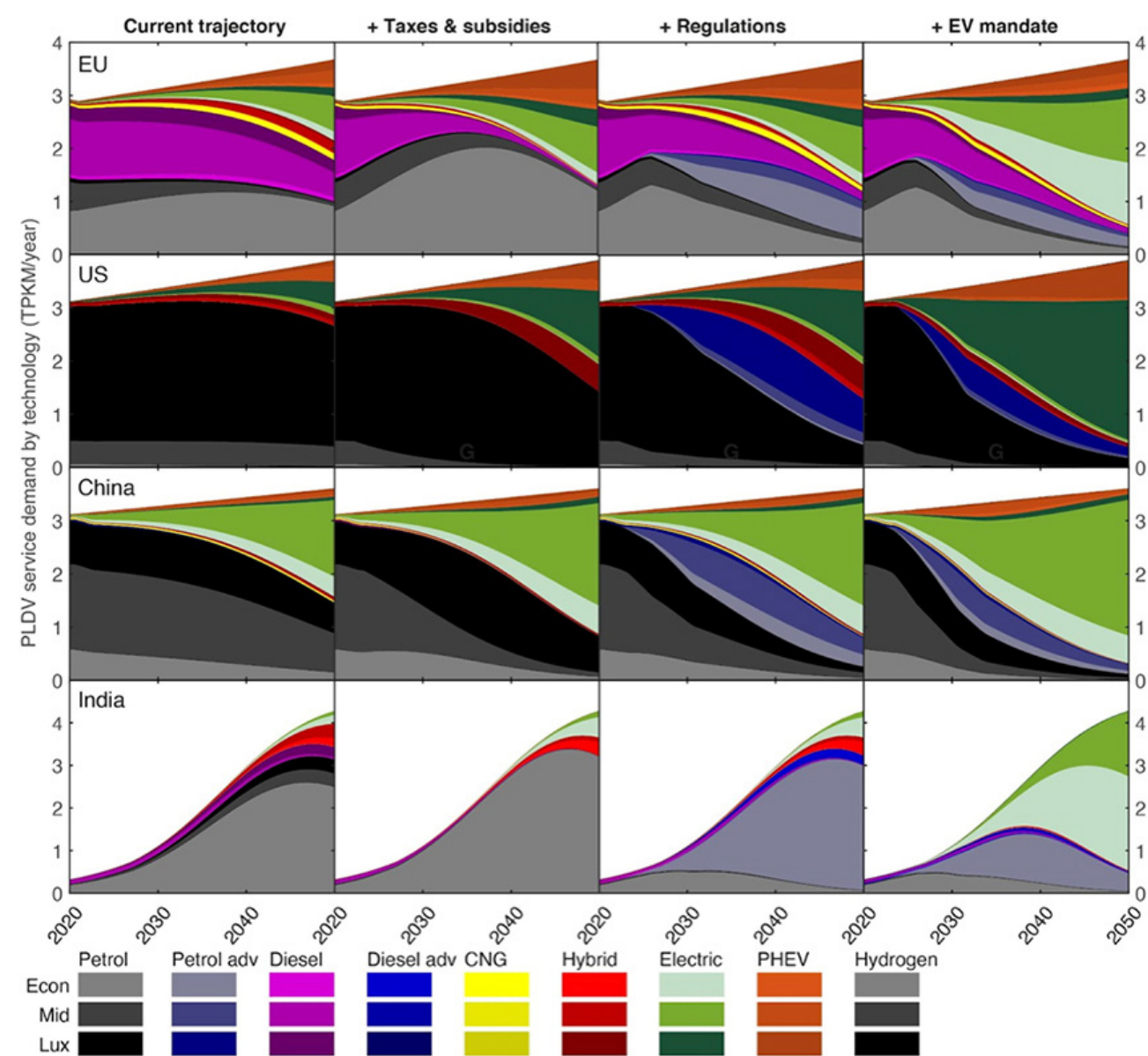
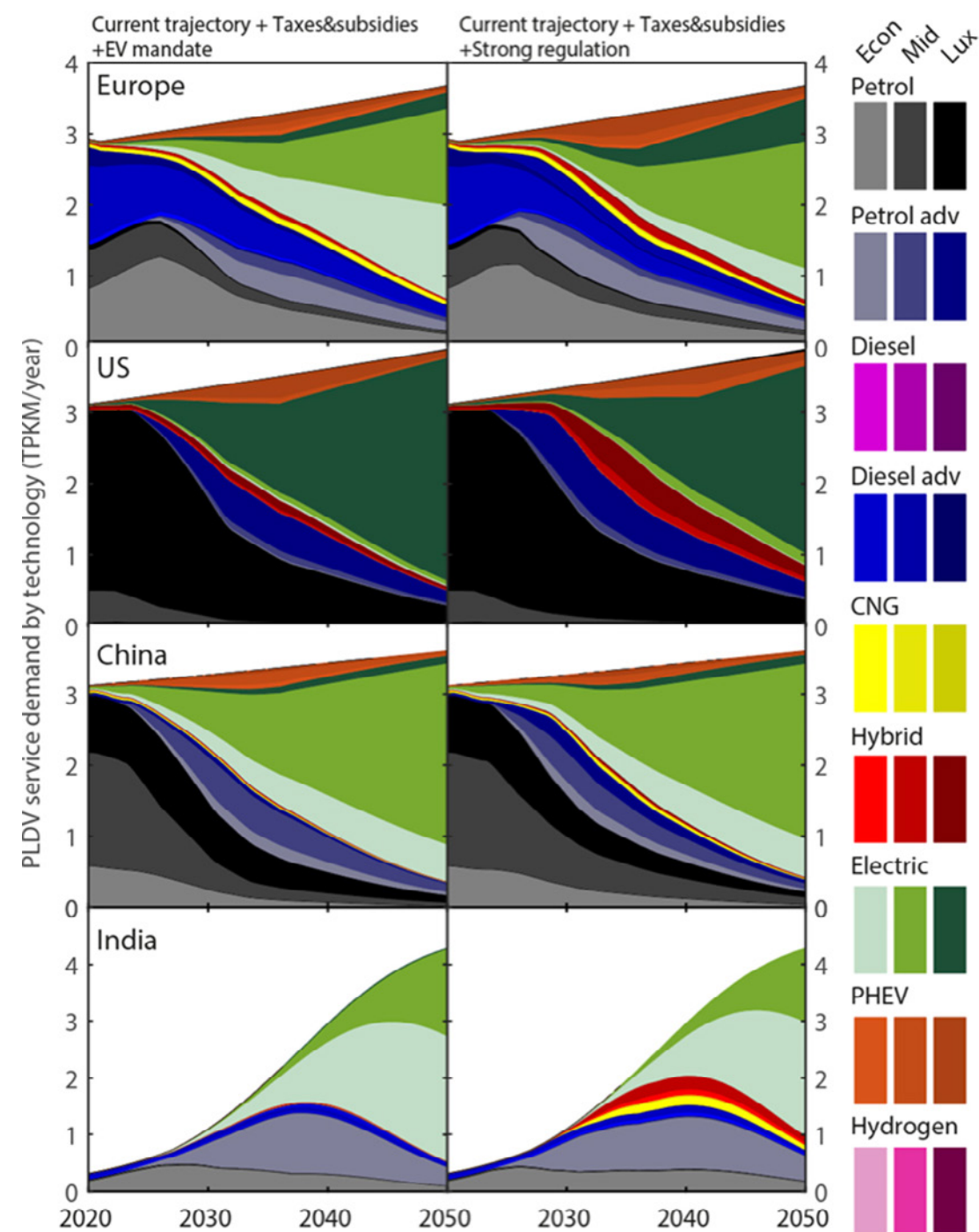


Figura 54: Simulações de regulações mais rígidas e cotas para ZEVs. A coluna A mostra cenários simulados de composição da frota assumindo a adoção de cotas para ZEVs além de impostos e subsídios. A coluna B mostra os cenários simulados de composição da frota assumindo a adoção de regulações de economia de combustível de aperto gradual para eliminar gradualmente os ICEVs, além de impostos e subsídios.¹⁷²



¹⁷¹ Lam, A., Mercure, J-F (2022). Evidence for a Global Electric Vehicle Tipping Point. GSI Working paper series number 2022/01. https://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/globalsystemsinsitute/documents/Lam_et_al_Evidence_for_a_global_EV_TP.pdf

¹⁷² Lam, A., Mercure, J-F (2022). Evidence for a Global Electric Vehicle Tipping Point. GSI Working paper series number 2022/01. https://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/globalsystemsinsitute/documents/Lam_et_al_Evidence_for_a_global_EV_TP.pdf

Figura 55: A cooperação internacional traz paridade de custos. Análise de paridade de custos entre ICEVs e BEVs para diferentes cenários de cooperação internacional para reduzir os custos de BEVs. Quanto mais países aderirem, mais cedo a diferença de custo entre BEVs e ICEVs chegará a zero. O impacto de adicionar o resto do mundo (*rest of the world* - RoW) só é visível para a Europa e os EUA, onde a paridade de custos é alcançada posteriormente. O impacto da adição da Índia não é mostrado porque as diferenças induzidas são pequenas, o mercado permanece pequeno em relação aos outros mostrados.¹⁷³

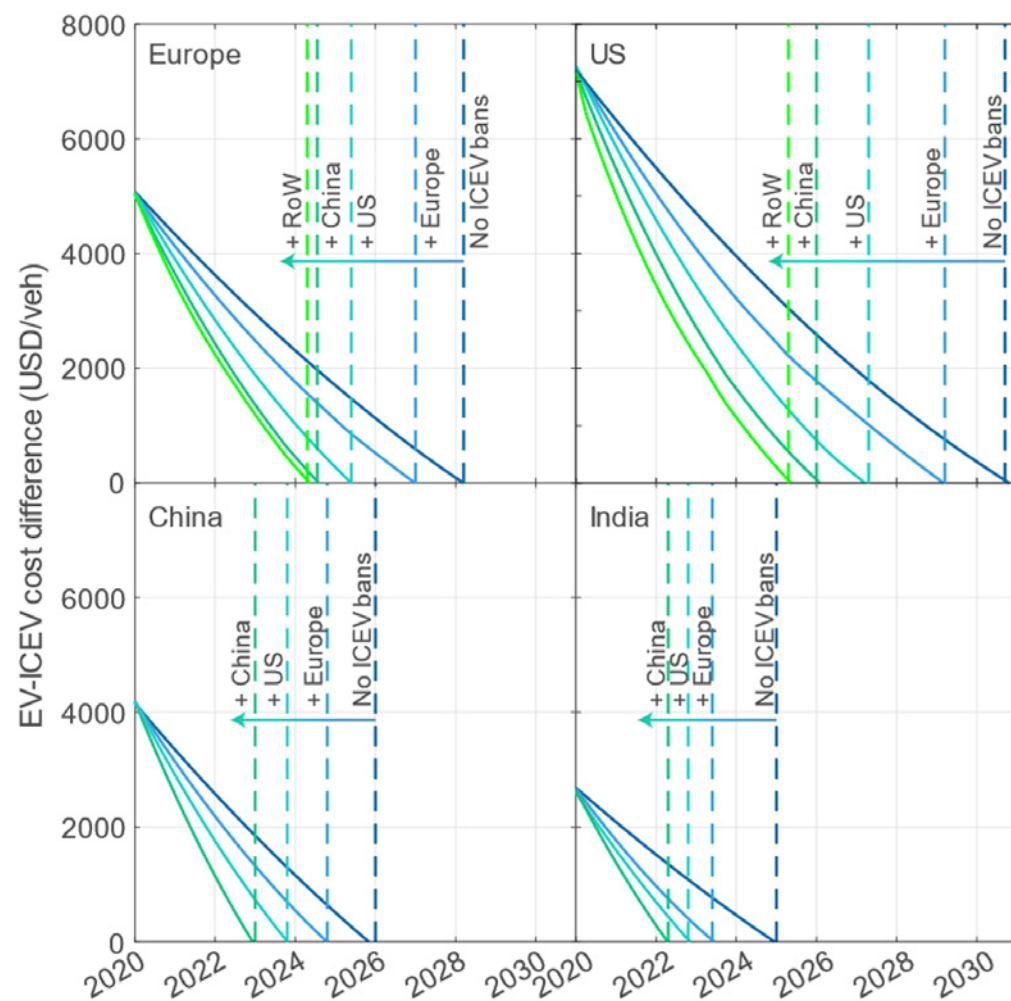
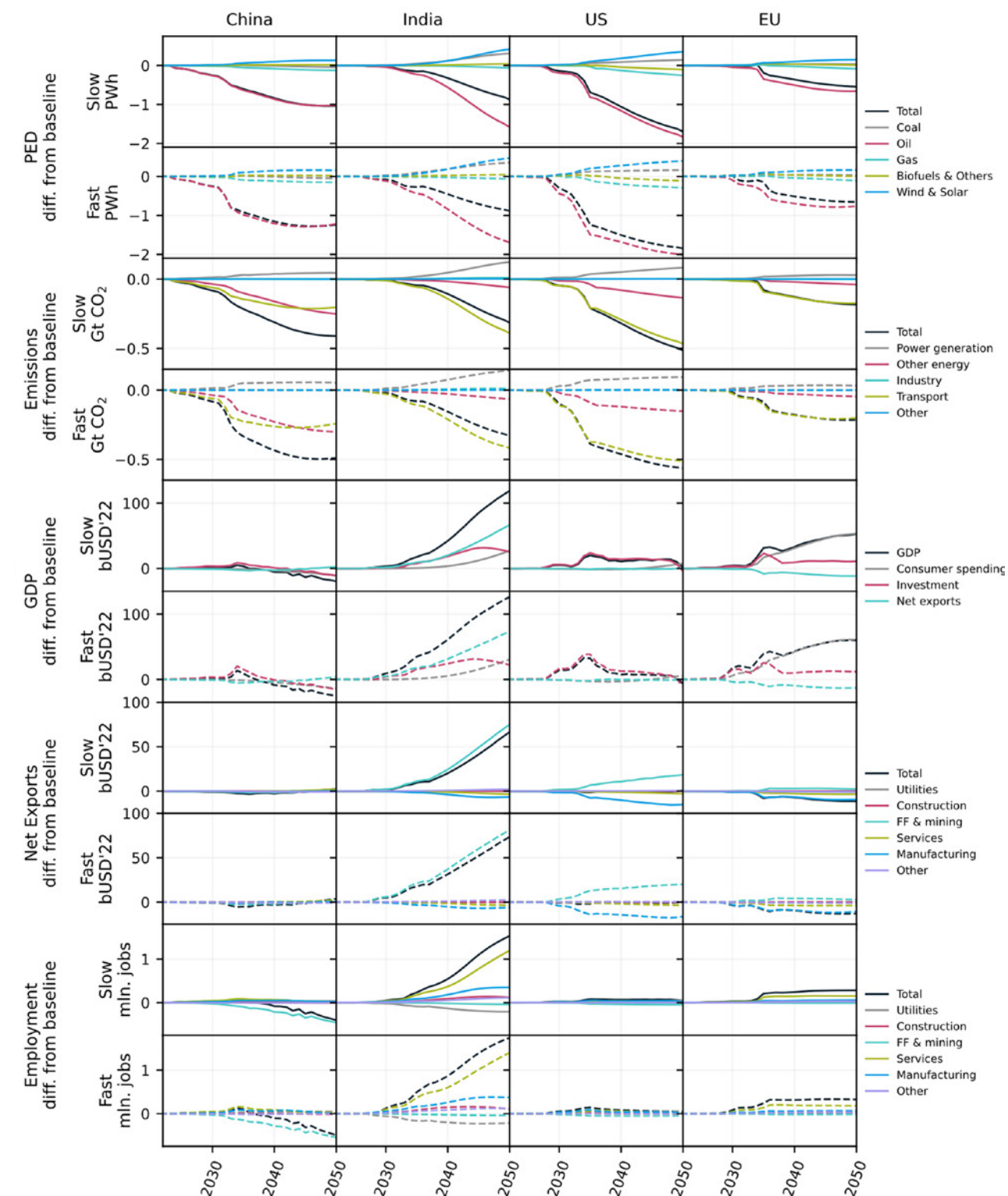


Figura 56: Impactos das transições lenta e rápida em relação ao referencial na demanda de energia primária (PED), emissões, PIB, exportações líquidas e emprego.



¹⁷³ Lam, A., Mercure, J-F (2022). Evidence for a Global Electric Vehicle Tipping Point. GSI Working paper series number 2022/01. https://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/globalsystemsinsitute/documents/Lam_et_al_Evidence_for_a_global_EV_TP.pdf

ESTUDO DE CASO:

Apoiando a expansão da agricultura sustentável: uma abordagem usando modelo baseado em agente

MATTEO CORONESE (SCUOLA SUPERIOR SANT'ANNA - PISA, IT), MARTINA OCCELLI (SCUOLA SUPERIOR SANT'ANNA - PISA, IT & UNIVERSIDADE DE CORNELL - ITHACA, EUA), FRANCESCO LAMPERTI (SCUOLA SUPERIOR SANT'ANNA & RFF-CMCC INSTITUTO EUROPEU DE ECONOMIA E MEIO AMBIENTE - MILÃO, IT), ANDREA ROVENTINI (SCUOLA SUPERIOR SANT'ANNA - PISA, IT & OFCE, SCIENCES PO - PARIS, FR)

Questão de política: As instituições devem apoiar a expansão da agricultura sustentável e quais fatores tornam essa intervenção mais urgente?

Região: Global

Método: Modelo baseado em agente

Principais conclusões: (1) As instituições devem promover e incentivar a agricultura sustentável; (2) a proteção e o estímulo a essas atividades são particularmente benéficos quando feitos nos estágios iniciais da simulação; (3) as políticas de apoio podem envolver uma mistura de instrumentos baseados em impostos e de comando e controle; (4) se as políticas de apoio forem introduzidas tarde demais, a lacuna tecnológica pode se tornar tão grande que fica impossível evitar um cenário de lock-in em práticas agrícolas não sustentáveis.

Engajamento: Este estudo de caso surgiu de uma longa e estreita colaboração entre as equipes de pesquisa do Instituto de Economia, do Instituto de Ciências da Vida e do Centro de Ciências das Plantas da Scuola Superior Sant'Anna. Tópicos, questões e partes da modelagem foram debatidos durante com stakeholders, incluindo funcionários do governo brasileiro e representantes do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Como tal, os resultados do estudo de caso foram produzidos em estreita colaboração com as partes interessadas nas políticas.

Resumo: Os autores usam um modelo ABM para simular uma série de políticas de apoio ao aumento da produtividade da agricultura sustentável. Especificamente, o estudo apresenta o modelo agriLOVE, caracterizado por alto nível de incerteza, reforço de *loops* de *feedbacks*, modelagem da concorrência entre empresas/fazendas, e heterogeneidade.

Introdução

Com a projeção de aumento da população global de forma constante durante o próximo século e a degradação do solo já afetando o cultivo das principais culturas em todo o mundo,¹⁷⁴ os sistemas agrícolas precisam encontrar rapidamente estratégias de expansão sustentáveis para garantir caminhos viáveis de segurança alimentar.^{175 176 177 178} Apoiar a intensificação da agricultura sustentável tornou-se uma necessidade crucial, pois o setor agrícola está lentamente erodindo recursos ambientais essenciais, contribuindo para o cruzamento perigoso de fronteiras ambientais e possivelmente ativando pontos de inflexão positivos/negativos.¹⁷⁹ Aqui, investigamos quais fatores podem impedir ou promover essa transição, garantindo a segurança alimentar e as implicações políticas subsequentes. Mais explicitamente, do ponto de vista das políticas, isso se traduz na seguinte questão: as instituições devem apoiar a expansão da agricultura sustentável e quais fatores tornam essa intervenção mais urgente?

Abordagem de modelagem

Com relação aos modelos canônicos de avaliação integrada (IAMs), os modelos ABM podem oferecer um paradigma alternativo válido para investigar essas questões. Eles são cada vez mais empregados no domínio da economia agrícola, devido à complexidade inerente das interações socioambientais.^{180 181 182 183} Além disso, eles facilmente acomodam representações realistas de tomadas de decisão racionalmente limitadas, interações sociais complexas entre diferentes atores (por exemplo, redes ou estruturas de propriedade), a presença de ciclos de *feedback* auto-reforçados, situações de *path-dependency* subjacentes, a integração de submodelos biofísicos e uma representação explícita de interações baseadas espacialmente não triviais.

Para investigar quais fatores podem ajudar ou impedir a transição para a agricultura sustentável, empregamos o modelo agriLOVE.¹⁸⁴ Ao contrário de outros modelos ABM agrícolas, o agriLOVE tem por característica modelar explicitamente a mudança técnica endógena na agricultura, permitindo assim investigar diferentes trajetórias da evolução dos paradigmas técnicos, sua absorção pelos agentes e seu resultado agregado – em termos de segurança alimentar e do esgotamento dos recursos naturais. Como tal, o modelo constitui uma plataforma de teste para políticas alternativas, cenários institucionais e ambientais e a avaliação de seus riscos e oportunidades relativos. Nossa abordagem está alinhada com a abordagem de análise de oportunidade-risco (*risk-opportunity analysis* – ROA).¹⁸⁵ Em particular, o modelo incorpora conceitos centrais da abordagem ROA, incluindo: i) incerteza radical (os agentes não conhecem a distribuição dos possíveis estados das coisas no mundo, que não podem ser conhecido a priori); ii) situações de *path-dependence*, onde cenários endógenos que emergem no modelo divergem entre si e dependem crucialmente das ações realizadas nos estados das coisas do sistema observados no passado; iii) desequilíbrio persistente, uma vez que a economia do modelo não tem tendência super-imposta de atingir um equilíbrio, mas gravita em torno de trajetórias estáveis como resultado de esforços contínuos de coordenação entre atores altamente heterogêneos; e iv) desproporcionalidade entre causa e efeito, onde pequenas perturbações no sistema podem levar a trajetórias drasticamente diferentes via situações de *path-dependence* e dinâmicas altamente não lineares. No estágio atual, o modelo não é parametrizado para uma área específica, mas sim representativo de macrorregiões caracterizadas principalmente pela agricultura de pequeno porte.

¹⁷⁴ Ray, D.K. et al. (2012). Recent Patterns of Crop Yield Growth and Stagnation. *Nature communications*, 3: 1293.

¹⁷⁵ Rockström, J. et al. (2017). Sustainable Intensification of Agriculture for Human Prosperity and Global Sustainability. *Ambio*, 46(1): 4-17.

¹⁷⁶ Ramankutty, N. et al. (2018). Trends in Global Agricultural Land Use: Implications for Environmental Health and Food Security. *Annual Review of Plant Biology* 69: 789-815.

¹⁷⁷ Tilman, D. et al. (2002). Agricultural Sustainability and Intensive Production Practices. *Nature*, 418(6898): 671-677.

¹⁷⁸ Howden, S.M. et al. (2007). Adapting Agriculture to Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50): 19691-19696.

¹⁷⁹ Steffen, W. et al. (2015). Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223): 1259855.

¹⁸⁰ Filatova, T. et al. (2013). Spatial Agent-Based Models for Socio-Ecological Systems: Challenges and Prospects. *Environmental Modelling & Software* 45: 1-7.

¹⁸¹ Berger, T. (2001). Agent-based Spatial Models Applied to Agriculture: A simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics* 25(2-3): 245-260.

¹⁸² Bert, F. E. et al. (2011). An Agent Based Model to Simulate Structural and Land use Changes in Agricultural Systems of the Argentine Pampas. *Ecological Modelling*, 222(19): 3486-3499.

¹⁸³ Berger, T. and Troost, C. (2014). Agent-based Modelling of Climate Adaptation and Mitigation Options in Agriculture. *Journal of Agricultural Economics*, 65(2): 323-348.

¹⁸⁴ Coronese, M. et al. (Forthcoming). AgriLove: Agriculture, Land-Use and Technical Change in an Evolutionary, Agent-Based Model. *Ecological Economics*.

¹⁸⁵ Mercure, J.-F. et al. (2021). Risk-Opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal. *Global Environmental Change*, 70: 102359.

O modelo é caracterizado por um conjunto de fazendas/agentes, operando em uma área espacialmente definida representando terras aráveis, bem como recursos naturais – terras virgens ou florestais (Figura 58C). Cada fazenda combina trabalho e terra para produzir um pacote homogêneo de alimentos. As fazendas são de propriedade de empresas, que coletam a produção e a vendem em um mercado centralizado e monopsonico. Os resultados do mercado, por sua vez, influenciam as decisões futuras realizadas pelas fazendas/empresas. Dada a forte incerteza tecnológica e ambiental, os agentes aprendem e empregam de forma adaptativa heurísticas que orientam suas decisões sobre investir em inovação e imitação – por exemplo, eles ajustam dinamicamente a quantidade de recursos investidos nessas atividades que são dispendiosas dependendo de seu fluxo de caixa e selecionam ativamente entre as fazendas vizinhas aquelas com melhor desempenho para poder imitar. Eles também contratam trabalhadores, adquirem novas fazendas, desmatam áreas virgens e abandonam terras improdutivas, tentando adaptar a produção para atender aos níveis futuros de demanda percebidos, possivelmente imprecisos. As atividades de inovação e imitação capturam, de forma evolutiva, os aspectos salientes do custoso processo de busca por novas formas de

aumentar a produtividade, incluindo aprendizado dinâmico e padrões de difusão de conhecimento em diferentes dimensões (proximidade tecnológica, proximidade espacial e efeitos de rede).

Nós nos concentramos aqui em modelar a dicotomia entre técnicas agrícolas convencionais versus técnicas sustentáveis – seguindo a taxonomia comum da literatura¹⁸⁶ – e investigar a difusão dinâmica e os padrões de aprendizado entre essas diferentes trajetórias tecnológicas. Normalmente, a agricultura convencional refere-se às práticas que usam produtos químicos sintéticos e fertilizantes para maximizar o rendimento de determinado conjunto de culturas, muitas vezes geneticamente modificadas e caracterizadas pela monocultura. Esses métodos requerem uma quantidade significativa de insumos químicos e energéticos e podem enfraquecer a ecologia de uma paisagem.¹⁸⁷ A agricultura sustentável comporta, ao contrário, uma definição mais ampla, geralmente identificando todos os paradigmas agrícolas que reintegram nutrientes do solo durante o processo de produção. Baseia-se em processos ecológicos, biodiversidade e ciclos adaptados às condições locais, ao invés do uso intensivo de insumos químicos.¹⁸⁸ Frequentemente desencadeia externalidades positivas para o ambiente como um todo.¹⁸⁹

Para fazer isso, assumimos que as técnicas convencionais tendem a produzir mais inovações que aumentam a produtividade do que as sustentáveis (Figura 58B) – refletindo seus rendimentos historicamente mais altos – e que as técnicas convencionais podem resultar em maior exploração dos recursos naturais disponíveis, como florestas. No entanto, o uso prolongado de técnicas convencionais levará à perda de produtividade devido à degradação do solo, possivelmente levando à estagnação da produtividade, observada no mundo real. Por outro lado, as técnicas sustentáveis têm menor potencial de crescimento, mas não levam ao esgotamento do solo. Os agentes escolhem dinamicamente qual tecnologia empregar, baseando sua decisão na produtividade percebida de uma determinada opção tecnológica nas áreas vizinhas (Figura 58A).

As atuais escolhas tecnológicas dos agentes influenciam não apenas os preços e a segurança alimentar contemporâneos, mas moldam dinamicamente as trajetórias de desenvolvimento de distintos paradigmas técnicos no setor agrícola, por meio de ciclos de retroalimentação nos gastos com inovação e em padrões de imitação/difusão. Como tal, o sistema pode evoluir para uma transição sustentável, um *lock-in* convencional (com colapso súbito de rendimentos e segurança alimentar) ou uma transição tardia (ultrapassagem), à medida que os agricultores convencionais recorrem ao aumento da força de trabalho ou ao desmatamento para fazer frente à estagnação rendimentos (Figura 58). Tanto as situações de *lock-in* quanto a transição tardia são altamente prejudiciais em termos de segurança alimentar, preços dos alimentos e esgotamento dos recursos naturais. A probabilidade desses cenários endógenos se realizarem depende crucialmente de vários fatores.

Figura 57: Painel A: Exemplo de fazendas com diferentes horizontes de observação (e, portanto, diferentes conjuntos de informações) de locais distintos na grade espacial do modelo, ao avaliar desempenhos relativos de diferentes opções tecnológicas. Painel B: Distribuição dos resultados da inovação para agricultura convencional e sustentável. O eixo X representa ganhos de produtividade, enquanto o eixo Y representa sua probabilidade relativa. A agricultura convencional apresenta um conjunto maior de oportunidades de inovação, levando a maior potencial de inovação e rendimentos (sem considerar a degradação do solo).

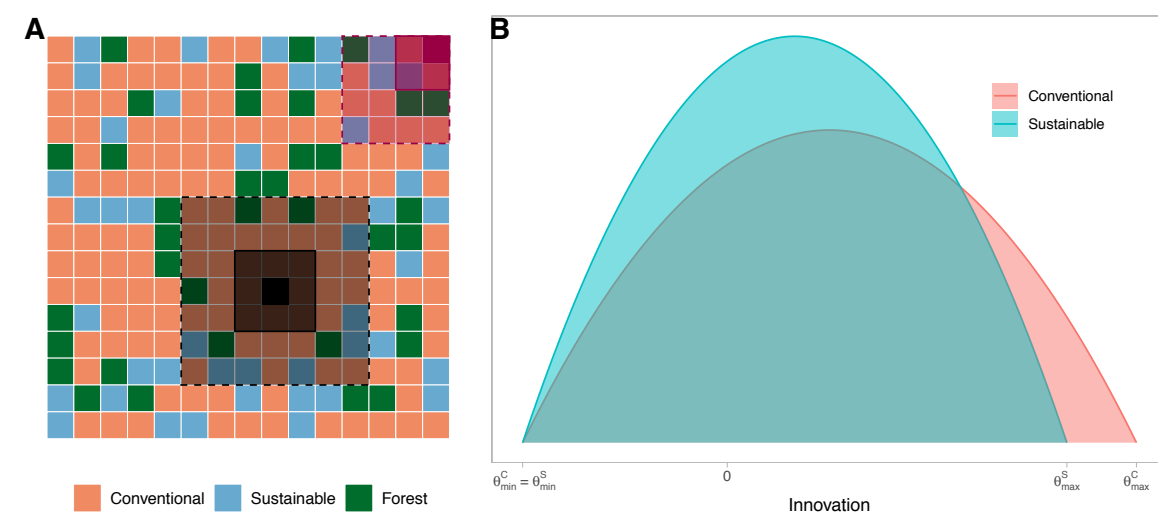
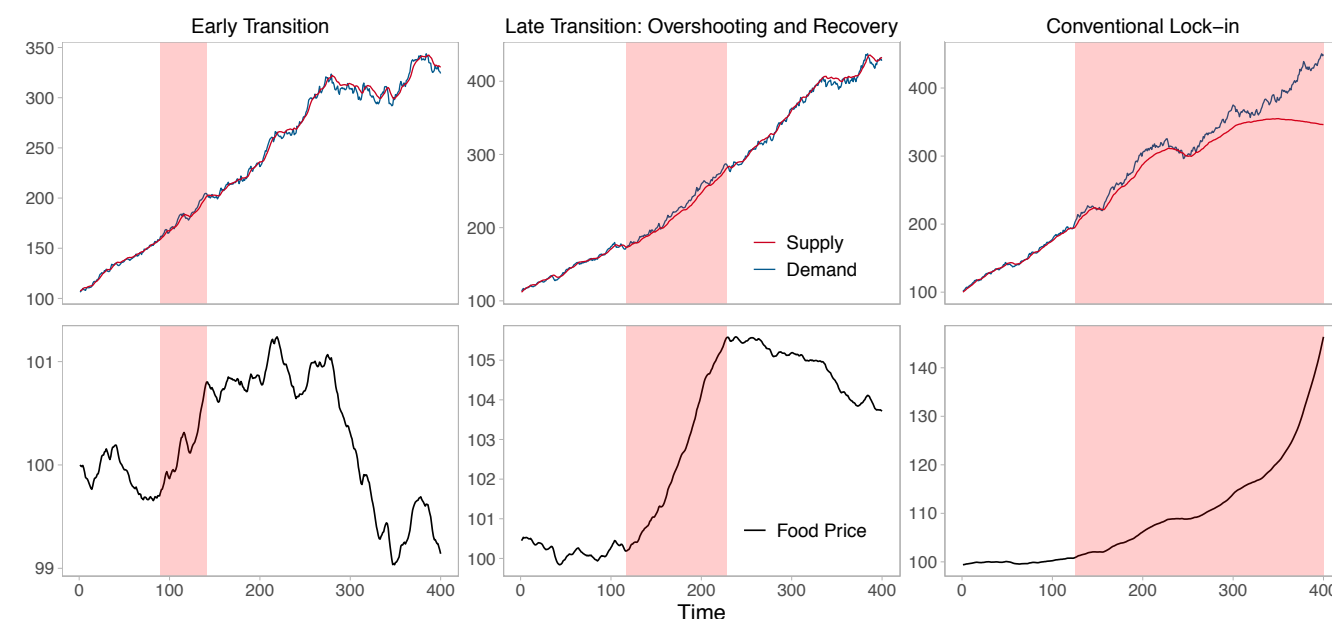


Figura 58: Três diferentes simulações do modelo, exemplificando os principais tipos de dinâmicas observadas: transição rápida para agricultura sustentável, ultrapassagem (ou transição tardia) e lock-in convencional. Para cada cenário simulado, são mostradas a distância entre a demanda e a oferta totais e a dinâmica dos preços dos alimentos. O eixo X representa as etapas de tempo na simulação do modelo, o eixo Y representa as alterações em relação aos valores iniciais (configurados como 100). As áreas vermelhas correspondem a períodos de alimentação insuficiente.



¹⁸⁶ Saifi, B. and Drake, L. (2008). A Coevolutionary Model for Promoting Agricultural Sustainability. *Ecological Economics*, 65(1): 24-34

¹⁸⁷ Schrama, M. et al. (2018). Crop Yield Gap and Stability in Organic and Conventional Farming Systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 256: 123-130.

¹⁸⁸ Gomiero, T. et al. (2011). Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional Vs. Organic Agriculture. *Critical Reviews In Plant Sciences*, 30(1-2): 95-124

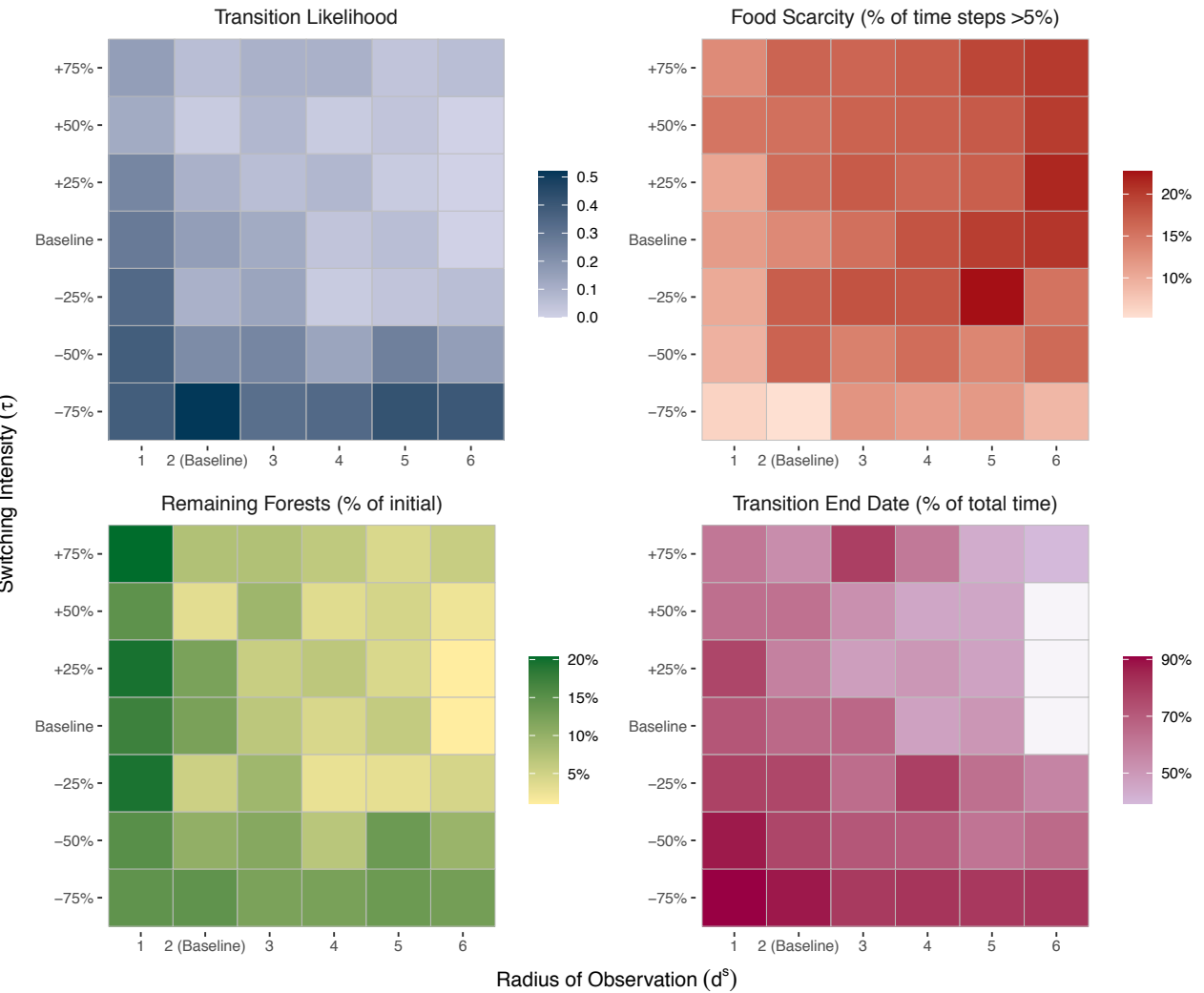
¹⁸⁹ Rockström, J. et al. (2017). Sustainable Intensification of Agriculture for Human Prosperity and Global Sustainability. *Ambio*, 46(1): 4-17.

Resultados

No geral, nossa análise mostra que o sistema agrícola, se não for apoiado por políticas apropriadas, tem pouca capacidade de promover uma transição sustentável, por causa de incentivos desalinhados e falhas de coordenação. Por exemplo, abordagens de curto prazo para aumentar a produtividade, como o esgotamento dos recursos naturais ou a superexploração do solo – que criam problemas de longo prazo –, geralmente concedem uma vantagem competitiva às fazendas

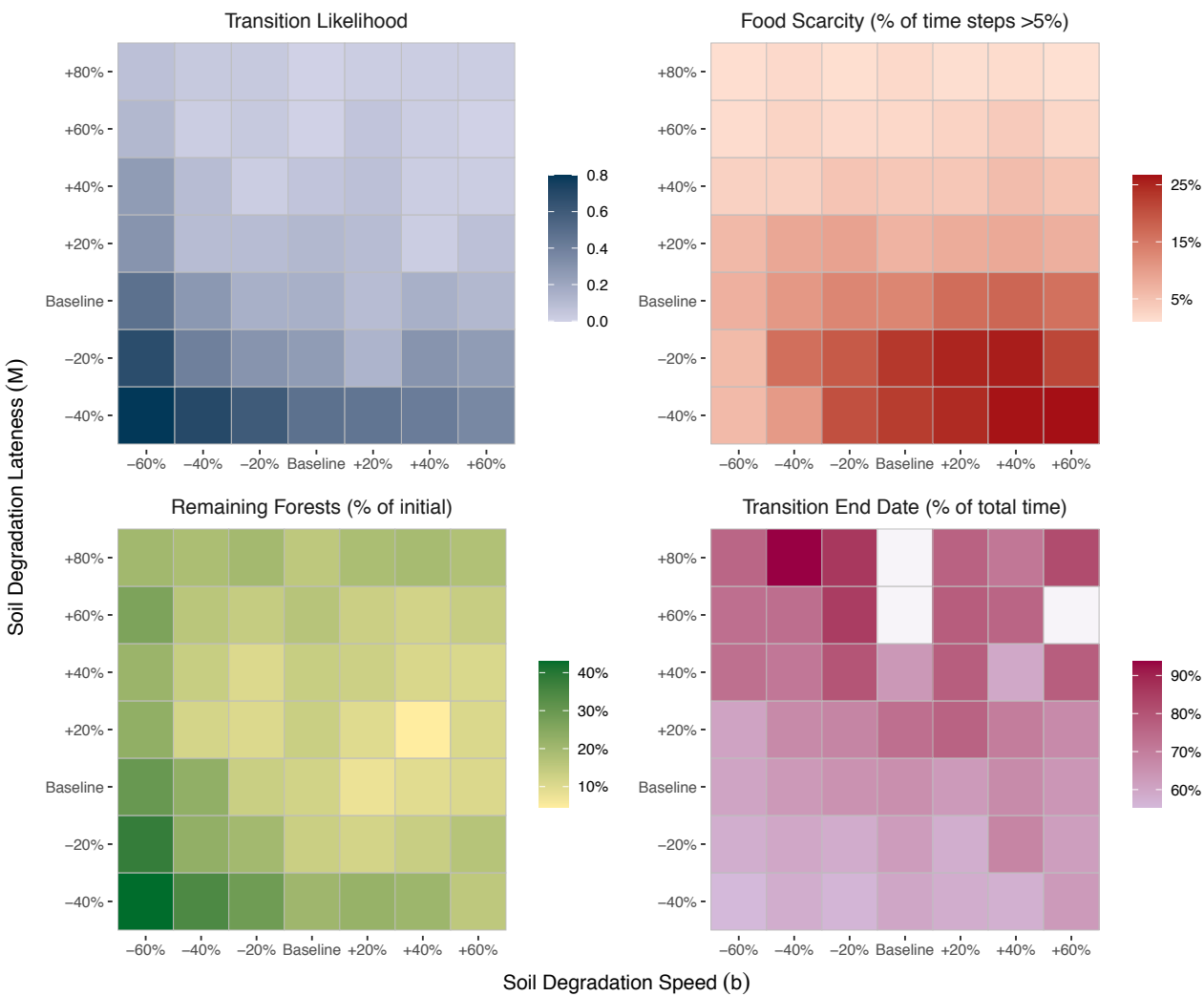
que as utilizam. Isso, via *path-dependence*, leva a maiores participações de mercado para fazendas que empregam técnicas convencionais, o que, por sua vez, atrasa ainda mais o aprendizado coletivo necessário para a trajetória sustentável. A Figura 59 mostra que a probabilidade de transição se deteriora rapidamente com a intensidade da mudança (uma medida da disposição das fazendas de mudar rapidamente sua tecnologia) e com as informações disponíveis, indicando uma posição de mercado frágil e precária dos agricultores sustentáveis.

Figura 59: Mapas de calor para diferentes valores de intensidade de troca (quanto os agentes pesam as diferenças percebidas no desempenho entre o convencional e o sustentável ao escolher seu regime agrícola) e raio de observação (ver Figura 57A). A probabilidade de transição é definida como a parcela do modelo de Monte Carlo simulada com a parcela final de fazendas sustentáveis superior a 90%. A data final da transição indica a porcentagem da duração da simulação onde a transição termina, fornecendo assim uma medida da velocidade da transição. A escassez de alimentos é definida como a parcela de etapas de tempo em que o suprimento de alimentos fica aquém da demanda de alimentos em mais de 5%. As florestas remanescentes são expressas como porcentagem do estoque inicial de florestas. Escassez de alimentos e florestas remanescentes são médias de Monte Carlo. 50 réplicas de Monte Carlo.



A Figura 60, ao contrário, mostra que os sistemas agrícolas têm um desempenho particularmente ruim em termos de favorecer a transição sustentável quando enfrentam fenômenos de degradação rápida e retardada do solo.

Figura 60: Mapas de calor para diferentes valores de velocidade de degradação do solo (quão rápido o dano máximo ao solo é alcançado quando os primeiros sinais de desaceleração da produtividade aparecem) e atraso (quão tarde no tempo os primeiros sinais de efeitos prejudiciais aparecem com uso prolongado). A probabilidade de transição é definida como a parcela do modelo de Monte Carlo simulada com a parcela final de fazendas sustentáveis superior a 90%. A data final da transição indica a porcentagem da duração da simulação na qual a probabilidade termina, fornecendo assim uma medida da velocidade da transição. A escassez de alimentos é definida como a parcela de etapas de tempo em que a oferta de alimentos fica aquém da demanda de alimentos em mais de 5%. As florestas remanescentes são expressas como porcentagem do estoque inicial de florestas. Escassez de alimentos e florestas remanescentes são médias de Monte Carlo. 50 réplicas de Monte Carlo.



Esse resultado aponta que os *feedbacks* do mercado podem ser insuficientes para promover uma transição oportuna e bem-sucedida ao lidar com *feedbacks* ambientais complexos, atrasados e não facilmente mensuráveis sobre produtividade e

rendimentos. No geral, a probabilidade de transição é afetada negativamente pelo crescimento da demanda de alimentos (Figura 61), colocando sérias preocupações sobre a segurança alimentar em cenários de rápido crescimento populacional.

Figura 61: Mapas de calor para diferentes taxas de crescimento da demanda de alimentos. A probabilidade de transição é definida como a parcela do modelo de Monte Carlo simulada com a parcela final de fazendas sustentáveis superior a 90%. A data final da transição indica a porcentagem da duração da simulação na qual a probabilidade termina, fornecendo assim uma medida da velocidade da transição. A escassez de alimentos é definida como a parcela de etapas de tempo em que a oferta de alimentos fica aquém da demanda de alimentos em mais de 5%. As florestas remanescentes são expressas como porcentagem do estoque inicial de florestas. Escassez de alimentos e florestas remanescentes são médias de Monte Carlo. 50 réplicas de Monte Carlo.



Por fim, a estrutura topológica da difusão sustentável (e sua interação com os recursos naturais disponíveis) também é importante. Conforme mostrado na Figura 62A e 62B, ter agricultores sustentáveis agrupados (o que pode favorecer a imitação local, mas retardar sua difusão por meio da absorção de tecnologia local) não afeta significativamente a

probabilidade de transição. No entanto, os recursos naturais agrupados (e, portanto, menos facilmente exploráveis) favorecem marginalmente a transição sustentável (Figura 62C), impedindo os agricultores convencionais de recorrer ao desmatamento como uma solução de curto prazo para rendimentos descendentes.

Figura 62: Mapas de calor para diferentes distribuições espaciais iniciais de fazendas convencionais e sustentáveis. A probabilidade de transição é definida como a parcela do modelo de Monte Carlo simulada com a parcela final de fazendas sustentáveis superior a 90%. A data final da transição indica a porcentagem da duração da simulação na qual a probabilidade termina, fornecendo assim uma medida da velocidade da transição. A escassez de alimentos é definida como a parcela de etapas de tempo em que o suprimento de alimentos fica aquém da demanda de alimentos em mais de 5%. As florestas remanescentes são expressas como porcentagem do estoque inicial de florestas. Escassez de alimentos e florestas remanescentes são médias de Monte Carlo. 50 réplicas de Monte Carlo.

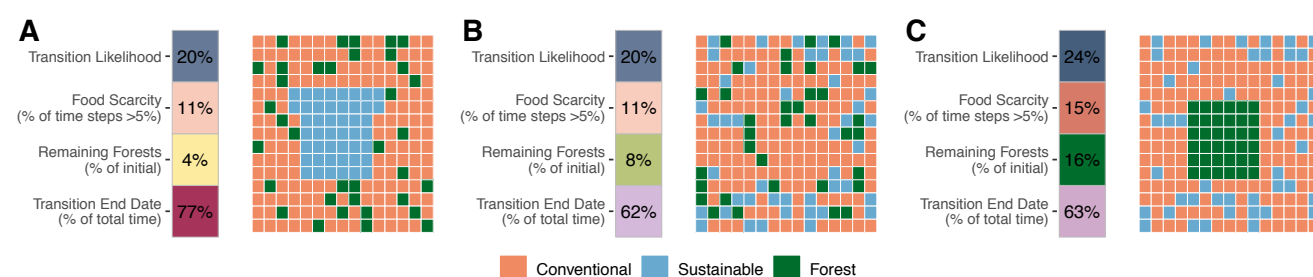
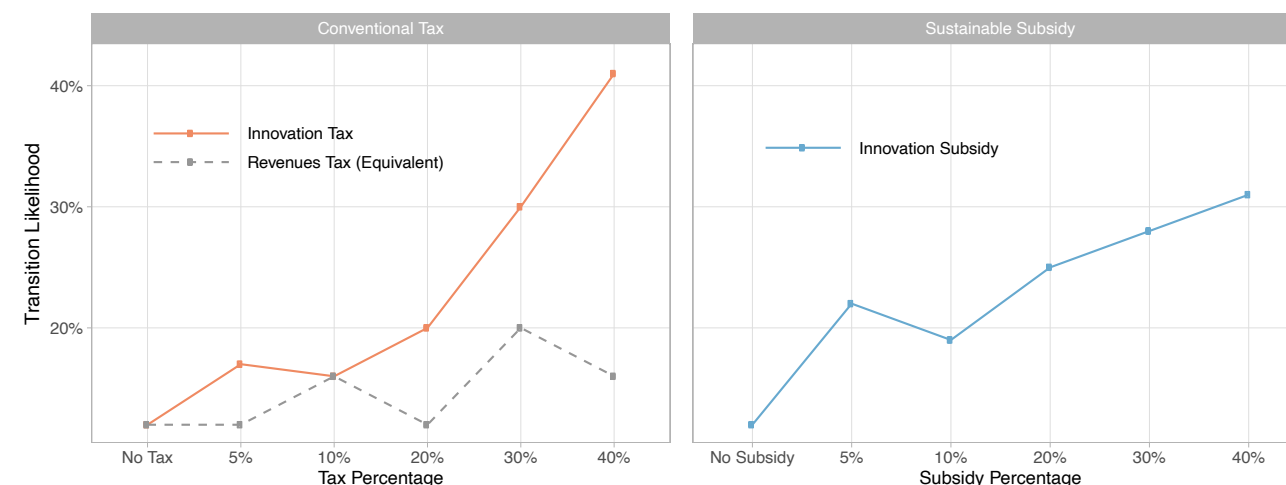


Figura 63: Probabilidades de transição para diferentes políticas. Os subsídios/impostos à inovação são porcentagens dos gastos com inovação do período anterior realizados por fazendas sustentáveis/convencionais. O valor do imposto sobre as receitas é igual ao equivalente monetário do imposto sobre inovação. A probabilidade de transição é definida como a parcela do modelo de Monte Carlo simulada com a parcela final de fazendas sustentáveis superior a 90%. A data final da transição indica a porcentagem da duração da simulação na qual a probabilidade termina, fornecendo assim uma medida da velocidade da transição. 100 réplicas de Monte Carlo.



Implicações e Conclusão da Política

O que emerge de nossa análise é que não apenas as instituições devem promover e incentivar a agricultura sustentável, mas é particularmente benéfico fazê-lo ainda nos estágios iniciais da simulação. As políticas de apoio podem envolver uma combinação de instrumentos tributários e regulatórios.

Do lado da demanda, as políticas voltadas para a redução do desperdício de alimentos certamente poderiam desempenhar um papel na diminuição da escassez de alimentos, embora estejam fadadas a perder eficácia progressivamente no que tange suprir a lacuna entre oferta e demanda em cenários de alto crescimento populacional. A dinâmica espacial também importa: incentivar comunidades agrupadas pode ajudar na imitação mútua e no aprendizado dinâmico, mas isso deve ser acompanhado de políticas que visem acelerar a velocidade de transição (por exemplo, impondo uma porcentagem mínima de terrenos a serem cultivados com técnicas sustentáveis em uma determinada data).

As políticas regulatórias podem ser altamente eficazes (por exemplo, simplesmente proibir o desmatamento), mas, ainda assim, podem resultar em grande escassez de alimentos no curto prazo se não forem combinadas com políticas oportunas para reduzir a lacuna de produtividade entre técnicas sustentáveis e convencionais. Políticas baseadas em taxaço podem envolver uma combinação de impostos sobre fazendas convencionais e incentivos para fazendas sustentáveis. Para maximizar seu impacto em termos

de probabilidade de transição – e minimizar seu efeito distorcivo – elas devem, no entanto, ser explicitamente direcionadas para aumentar os recursos que as fazendas investem em inovação e imitação de atividades agrícolas sustentáveis.

A Figura 63 mostra os efeitos desses dois tipos de políticas diferentes. Os subsídios para fazendas sustentáveis já são eficazes em aumentar a probabilidade de transição com valores relativamente baixos, embora sua eficácia aumente menos do que linearmente, junto com o valor do subsídio. Isso indica que os subsídios podem representar uma ferramenta poderosa para impulsionar a expansão da agricultura sustentável, embora com eficácia limitada devido à lacuna estrutural entre técnicas convencionais e sustentáveis (ver Figura 57B). Por outro lado, ao tributar os agricultores convencionais, a probabilidade de transição aumenta mais do que linearmente com o peso do imposto. No entanto, os impostos são altamente ineficazes se seu valor não for substancial ou se não forem direcionados diretamente aos gastos com inovação (consulte Imposto sobre receitas na Figura 63).

Em outras palavras, políticas centralizadas destinadas a suprir a lacuna de produtividade entre técnicas sustentáveis e convencionais são necessárias, mas dependem do tempo, com janelas de oportunidade se fechando rapidamente. Se as políticas de apoio forem introduzidas tarde demais, a lacuna tecnológica pode se tornar tão grande que se torna impossível evitar um cenário de *lock-in* em práticas agrícolas não sustentáveis.

ESTUDO DE CASO:

Modelando transições no mercado de trabalho: o caso das mudanças de produtividade no Brasil

ANNA BERRYMAN (UNIVERSIDADE DE OXFORD), JORIS BÜCKER (UNIVERSIDADE DE OXFORD), FERNANDA SENRA DE MOURA (UNIVERSIDADE DE OXFORD), PETE BARBROOK-JOHNSON (UNIVERSIDADE DE OXFORD), MAREK HANUSCH (BANCO MUNDIAL), PENNY MEALY (BANCO MUNDIAL/UNIVERSIDADE DE OXFORD), MARIA DEL RIO-CHANONA (COMPLEXITY HUB VIENNA), J. DOYNE FARMER (UNIVERSIDADE DE OXFORD)

Questão de política: Como o desemprego no nível ocupacional seria afetado por trajetórias de crescimento com diferentes *drivers* e resultados de emissões no Brasil?

Região: Brasil

Método: Uma rede de mobilidade ocupacional baseada em dados combinada com um modelo baseado em agentes.

Principais conclusões: O número de ocupações que enfrentam maior desemprego devido à mobilidade limitada é menor em uma trajetória de crescimento impulsionado pela indústria (ou seja, emissões mais baixas) (21% das ocupações) do que em uma trajetória de crescimento impulsionado pela agricultura (ou seja, emissões mais altas) (49%). Portanto, mais esforços para aumentar a produtividade na indústria estão mais alinhados com as metas de redução de emissões do país e resultam em menos atritos no mercado de trabalho.

Engajamento: Este estudo de caso surgiu de uma colaboração entre os autores e o escritório do Banco Mundial no Brasil. Os dados sobre movimentação de trabalhadores, os cenários de interesse e o modelo de Equilíbrio Geral Computável (*Computable General Equilibrium* - CGE) com o qual foram desenvolvidos vieram da equipe do Banco Mundial. O quadro conceitual e as conclusões foram desenvolvidos pelos autores com contribuições do Banco Mundial. Este estudo de caso deverá ser aprofundado com o Banco Mundial em trabalhos futuros, tanto em termos metodológicos, quanto no refinamento das implicações políticas. Também devem-se buscar contribuições do governo brasileiro, por meio da comunidade de colaboradores do Projeto EEIST no Brasil, para explorar cenários adicionais que possam ser de interesse.

Resumo: Os autores combinam os resultados do modelo macroeconômico com uma simulação dinâmica do mercado de trabalho para estudar como, em um contexto de transição verde, mudanças de produtividade em diferentes setores e regiões podem afetar o desemprego em nível ocupacional no Brasil. Especificamente, o estudo combina uma rede de mobilidade ocupacional orientada por dados com um modelo de mercado de trabalho baseado em agentes para explicar a mobilidade limitada e os atritos de segunda ordem no mercado de trabalho. Com essa abordagem, se discute como as mudanças na demanda de trabalho afetam as ocupações, dependendo de quanta mobilidade pode ser esperada de e para outras ocupações. Os resultados mostram que o aumento da produtividade na indústria resulta em menos atritos no mercado de trabalho do que o aumento da produtividade na agricultura.

Introdução

O Brasil é um dos maiores emissores de gases de efeito estufa do mundo,¹⁹⁰ com a maior parte das emissões ligadas à agricultura, direta e indiretamente, uma vez que a demanda por terras agrícolas ainda impulsiona o desmatamento (Ferreira Filho e Hanusch, 2022).¹⁹¹ Em 2021, as emissões oriundas de mudanças no uso da terra e de florestas representaram mais de 49% do total, com emissões da agricultura correspondendo a quase 25%.¹⁹²

Em 2020, o Brasil atualizou sua meta de emissões (*Nationally Determined Contribution* - NDC) com uma nova meta intermediária¹⁹³ e, em relação aos níveis de 2005, quer reduzir suas emissões em 37% em 2025 e em 43% em 2030, com uma meta de longo prazo de neutralidade de carbono até 2060. Gurgel, Paltsev e Breviglieri (2019)¹⁹⁴ argumentam que a meta da NDC de 2030 poderia ser alcançada principalmente por meio da redução do desmatamento e de mudanças nas práticas agrícolas. No longo prazo, Soterroni et al (2022)¹⁹⁵ argumentam que interromper o desmatamento e promover a recuperação será fundamental para alcançar o zero líquido.

Embora o Código Florestal brasileiro seja uma política de comando e controle fundamental para preservar e recuperar a vegetação nativa - e, portanto, reduzir as emissões - seu rigor e cumprimento contínuo estão sujeitos a pressões econômicas. Por um lado, a agricultura altamente competitiva do Brasil é ainda intensa na demanda por terra. Por outro lado, a restrição da oferta de terras pode causar perdas de bem-estar devido à redução do emprego agrícola e ao aumento dos preços dos alimentos (Ferreira Filho e Hanusch, 2022).

Nesse contexto, Ferreira Filho e Hanusch (2022) consideram diferentes trajetórias de crescimento e como elas impactariam o desmatamento e as emissões no Brasil. Os autores mostram que a transição para um modelo de crescimento

da produtividade da indústria ou de serviços pode reduzir significativamente as emissões e o desmatamento, ao mesmo tempo em que sustenta o crescimento do PIB no longo prazo, com a indústria gerando as maiores reduções de emissões. Por outro lado, o crescimento da produtividade agrícola leva a emissões mais altas e pode levar tanto a um aumento quanto a uma diminuição do desmatamento, dependendo de onde o crescimento da produtividade ocorre, se na Amazônia ou em outro lugar, respectivamente (ver Ferreira Filho e Hanusch, 2022, para mais detalhes).

Em ambos os casos, à medida que a produtividade cresce, a demanda relativa por mão de obra em diferentes ocupações provavelmente muda, potencialmente exigindo que os trabalhadores mudem de ocupação. Vários modelos econômicos, incluindo modelos insumo-produto e CGE, estimam as mudanças na demanda de trabalho de diferentes indústrias em um cenário de transição. No entanto, essas estimativas muitas vezes não levam em conta os atritos do mercado de trabalho que limitam a mobilidade dos trabalhadores entre empregos. Estudos recentes argumentam que a mobilidade limitada da mão de obra precisa ser levada em consideração - em geral, e ao modelar a transição pós-carbono¹⁹⁶ - pois, na realidade, alguns trabalhadores podem achar mais difícil, ou mesmo impossível, mudar para certas ocupações e podem enfrentar taxas de desemprego mais altas como resultado. Da mesma forma, as empresas podem enfrentar mais escassez de habilidades e vagas não preenchidas em ocupações que crescem durante a transição.

O modelo do mercado de trabalho

Para levar em conta a estrutura do mercado de trabalho e as fricções que podem limitar a mobilidade do trabalhador, neste estudo de caso modelamos a dinâmica do mercado de trabalho no nível da ocupação usando o modelo de rede de mobilidade ocupacional baseado em dados desenvolvidos por Del Rio-Chanona, Mealy, Beguerisse - Díaz, Lafond e Fazendeiro.¹⁹⁷

¹⁹⁰ UNEP, UNEP Copenhagen Climate Centre (UNEP-CCC). Emissions Gap Report 2021. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021>.

¹⁹¹ Ferreira Filho, J. and Hanusch, M. (2022). A Macroeconomic Perspective of Deforestation in Brazil's Legal Amazon. Policy Research Working Papers; 10162. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/38253>.

¹⁹² SEEG (Greenhouse Gas Emission and Removal Estimating System). Based on total emissions - CO₂e(t) GWP-AR5.

¹⁹³ Embora com uma linha de base diferente, tornando a meta menos, em vez de mais, ambiciosa na prática (UNEP, UNEP-CCC, Emissions Gap Report 2021).

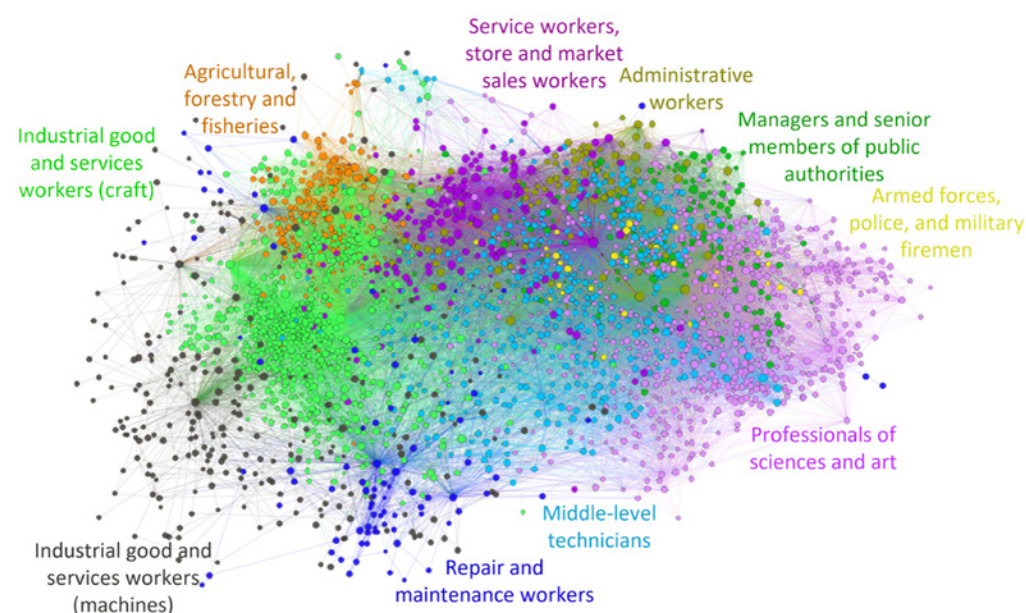
¹⁹⁴ Gurgel, A. et al. (2019). The Impacts of the Brazilian NDC and their Contribution to the Paris Agreement on Climate Change. *Environment and Development Economics*, 24(4): 395-412.

¹⁹⁵ Soterroni, A. et al. (2022). Nature-Based Solutions are Critical for Putting Brazil on Track Towards Net Zero. Preprints 2022, 2022110054.

¹⁹⁶ Castellanos, K. and Heutel, G. (2019). Unemployment, Labour Mobility and Climate Policy. National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w25797>

¹⁹⁷ del Rio-Chanona, M.R. et al. (2021). Occupational Mobility and Automation: A Data-Driven Network Model. *Journal of the Royal Society Interface*. <https://doi.org/10.1098/rsif.2020.0898>

Figura 64: Rede de mobilidade ocupacional. Cada nó representa uma ocupação de seis dígitos e bordas mais largas entre as ocupações significam mais mobilidade ocupacional. As ocupações são coloridas por sua ocupação de nível de um dígito (consulte os rótulos) e dimensionadas pelo logaritmo do emprego total da respectiva ocupação.



Começamos construindo nossa rede empírica de mobilidade ocupacional¹⁹⁸ (Figura 64) usando o conjunto de dados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS), que contém informações de todas as combinações trabalhador-emprego-empresa de contratos ativos no Brasil em algum momento do ano, para o período de 2011 a 2019. A rede resultante consiste em 2.591 nós – representando ocupações de seis dígitos¹⁹⁹ – e uma aresta entre dois nós reflete a probabilidade de um trabalhador transitar de uma ocupação para outra, conforme registrado na RAIS.

Em seguida, elaboramos um modelo de mercado de trabalho baseado em agentes que compreende o número de trabalhadores empregados, desempregados²⁰⁰ e vagas abertas em cada ocupação em cada intervalo de tempo. Os trabalhadores candidatam-se a postos de trabalho de acordo com as limitações da rede de mobilidade profissional; ou seja, só podem concorrer a vagas em ocupações às quais estejam vinculados na rede de mobilidade ocupacional (suas ocupações vizinhas). Os trabalhadores são demitidos e as vagas são abertas por meio de dois processos; um processo aleatório e um processo dependente do estado que responde à diferença entre a demanda realizada específica da ocupação

(ou seja, emprego mais vagas) e a demanda-alvo de cada cenário. Se a demanda realizada for menor (ou maior) que a demanda-alvo no cenário, mais vagas são abertas naquela ocupação e menos trabalhadores são demitidos (ou vagas são encerradas e mais trabalhadores são demitidos).

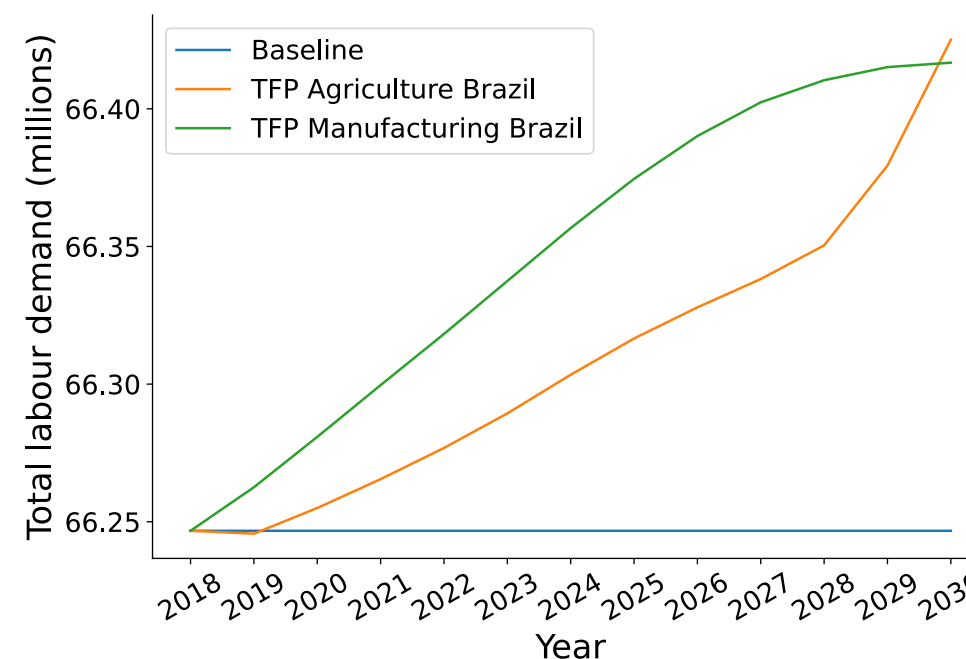
A mudança estrutural do Brasil para o Crescimento Verde

Usamos as estimativas de demanda de trabalho em nível de produto de Ferreira Filho e Hanusch (2022) para simular a demanda de trabalho no nível da ocupação e, com nosso modelo de mercado de trabalho, estudamos o desemprego no nível da ocupação sob as fricções de mobilidade dadas pela rede de mobilidade ocupacional.

Cenários de política

Para investigar como a mudança estrutural para o crescimento pode afetar os trabalhadores em diferentes ocupações, aplicamos dois cenários de política diferentes de Ferreira Filho e Hanusch (2022): um aumento da produtividade na indústria e um aumento da produtividade na agricultura no Brasil, em comparação com um cenário de referência que não assume nenhuma mudança de produtividade. Ambos

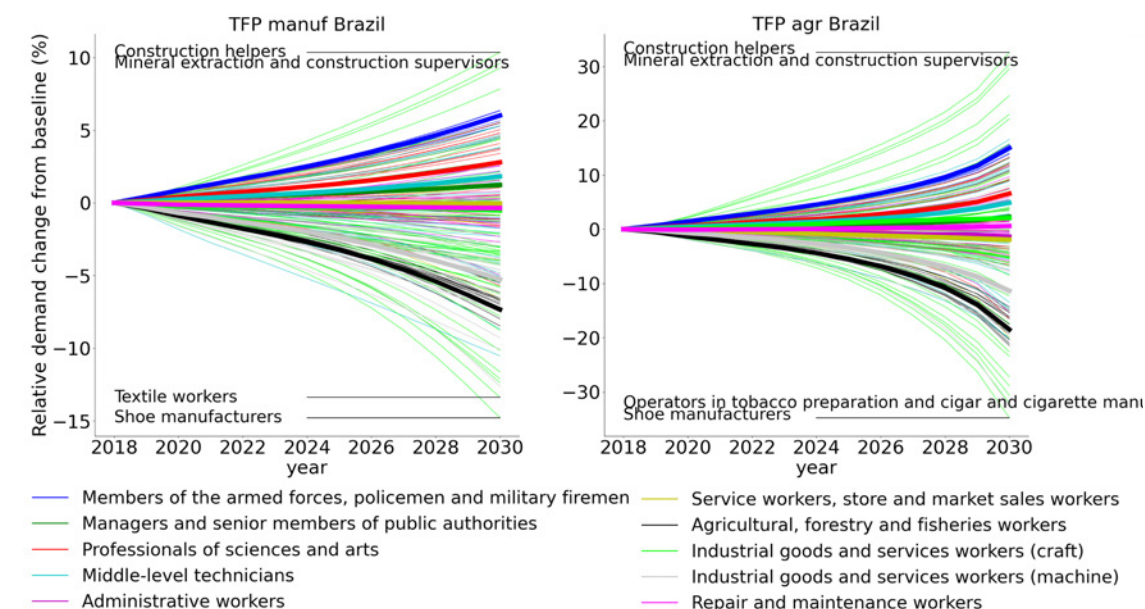
Figura 65: Demanda total de mão de obra para cada cenário com a demanda total de mão de obra para o cenário de referência (base line) mantida constante de 2018 a 2030.



levam ao crescimento do PIB, mas o crescimento da produtividade agrícola levaria a mais emissões de gases de efeito estufa.²⁰¹ Ferreira Filho e Hanusch (2022) descobriram com seu modelo CGE TERM-BR que um aumento anual permanente nacional da produtividade total dos fatores (*total factor productivity* - TFP) de 0,5%

na indústria leva a um PIB cumulativo de 3,9% maior em 12 anos, com 0,8 milhões de hectares a menos de desmatamento e mais de 67.833 kT de emissões de CO2 a menos no Brasil em comparação com o cenário de referência.

Figura 66: Demanda de emprego por ocupação em comparação com ao cenário de referência para o cenário com crescimento da TFP na indústria (à esquerda) e com crescimento da TFP na agricultura (à direita). As linhas em negrito representam a média das ocupações agrupadas por nível de um dígito (ver legenda). As linhas finas são ocupações agrupadas no nível de três dígitos, coloridas por sua classificação de um dígito. As duas ocupações de três dígitos superior e inferior por impacto são rotuladas.



¹⁹⁸ Mealy, P. et al. (2018). What You Do At Work Matters: New Lenses On Labour. SSRN Electronic Journal, Apr 2018.

¹⁹⁹ Todas as ocupações são classificadas de acordo com a Classificação Brasileira de Ocupações (CBO) de 2002. Esta é uma classificação estruturada, onde cada ocupação detalhada possui um código de seis dígitos. Ocupações que compartilham os mesmos primeiros dígitos podem ser agrupadas. Neste estudo de caso, também usamos os códigos de ocupação de três dígitos e de um dígito. Existem 2.591 ocupações de seis dígitos em nosso estudo de caso, que podem ser agrupadas em 196 ocupações de três dígitos ou dez ocupações de um dígito. Por exemplo, o código de seis dígitos 913110 refere-se a Mecânica de manutenção para equipamentos de mineração; essas ocupações de seis dígitos estão incluídas no código de três dígitos 913, que se refere a todos os Mecânicos de manutenção de máquinas pesadas e equipamentos agrícolas; o código de um dígito 9 refere-se a todos os trabalhadores de reparação e manutenção.

²⁰⁰ Um trabalhador desempregado conta como desempregado na ocupação em que esteve empregado mais recentemente.

Contrariamente, um aumento anual permanente de 0,5% na TFP agrícola no Brasil levaria a um aumento cumulativo de 1,8% no PIB, com 0,3 milhão de hectares a menos de desmatamento, mas 18.221 kT a mais de emissões de CO2 no mesmo período.

Demanda projetada de mão de obra por ocupação

Traduzimos as mudanças na demanda de trabalho por *commodity* em mudanças na demanda de trabalho por ocupação usando dados da RAIS de 2018 sobre a composição indústria-ocupação. Como nosso mercado de trabalho baseado em agentes não modela o crescimento populacional, renormalizamos o crescimento populacional a partir das projeções de demanda de trabalho, mantendo a demanda total de trabalho constante no cenário de referência (*base line*). Mantemos a variação da demanda total de trabalho para cada aumento de produtividade em relação ao cenário de referência. Na Figura 65, mostramos a demanda de trabalho total ajustada para a linha de base e cenários.

Quando desagregamos a demanda de trabalho por ocupação, descobrimos que em ambos os cenários a demanda por trabalhadores agrícolas diminui e a demanda por trabalhadores em serviços públicos e educação aumenta (ver Figura 66). O cenário de crescimento da TFP agrícola leva a muito mais mudanças de demanda relativa ocupacional em relação ao cenário de referência do que o cenário de crescimento da TFP industrial: no nível de três dígitos, os grupos de ocupações com o maior crescimento (declínio) na demanda experimentam +10% (-15%) no cenário de crescimento da TFP industrial e +33% (-35%) no cenário de crescimento da TFP agrícola. No entanto, ambos os cenários mostram um declínio na demanda por trabalhadores agrícolas e algumas ocupações da indústria em comparação com o cenário de referência, enquanto trabalhadores de serviços e ocupações de construção experimentam um aumento na demanda.

Um aumento na TFP de um setor implica que menos demanda de mão de obra é necessária para a mesma produção, mas os efeitos do equilíbrio geral podem anular isso e aumentar a demanda de mão de obra de um setor. Um aumento de produtividade torna mais barato produzir um determinado produto, o que pode levar a um preço de equilíbrio mais baixo. Se a demanda permanecer relativamente estável, apesar do preço mais baixo, o emprego precisa diminuir para que a oferta atenda à demanda.

Se, no entanto, um preço mais baixo aumenta muito a demanda, mais trabalhadores são necessários. Isso pode explicar parte da diferença nas trajetórias de demanda por ocupações na Figura 66.

A queda da demanda em ambos os cenários para os trabalhadores agrícolas pode, portanto, ser explicada da seguinte forma. Um aumento da produtividade agrícola leva a mais produção com o mesmo número de trabalhadores. Isso pode resultar em salários mais altos para seus trabalhadores e/ou preços mais baixos para produtos agrícolas. Nesse caso, o aumento da demanda devido aos preços mais baixos não é suficiente para contrabalançar o crescimento da produtividade. Como resultado, a demanda por trabalhadores diminui. Para o outro cenário, um aumento na produtividade da indústria pode levar a preços mais baixos e salários mais altos no setor industrial. Os aumentos salariais não se restringem à indústria, mas também (parcialmente) afetam a agricultura devido às pressões da concorrência trabalhista. Salários mais altos, neste caso, não são compensados por mais demanda, pois os trabalhadores recebem salários mais altos e a demanda por trabalhadores no setor agrícola diminui.

Resultados

Rodamos o modelo de mercado de trabalho baseado em agentes para o cenário de TFP agrícola, para o cenário de TFP da indústria e para o cenário de referência usando a rede de mobilidade ocupacional e, como comparação, uma rede sem atrito completamente conectada, na qual os trabalhadores podem alternar entre todas as ocupações sem qualquer atrito. Na Figura 67, para cada choque da TFP, plotamos a variação (percentual) na demanda por trabalho em 2030²⁰² (com referência ao cenário de linha de base) em relação à variação média (ponto percentual) da taxa de desemprego de 2018 a 2030, também com referência à linha de base. Fizemos isso usando tanto a rede de mobilidade ocupacional quanto a rede sem atrito.

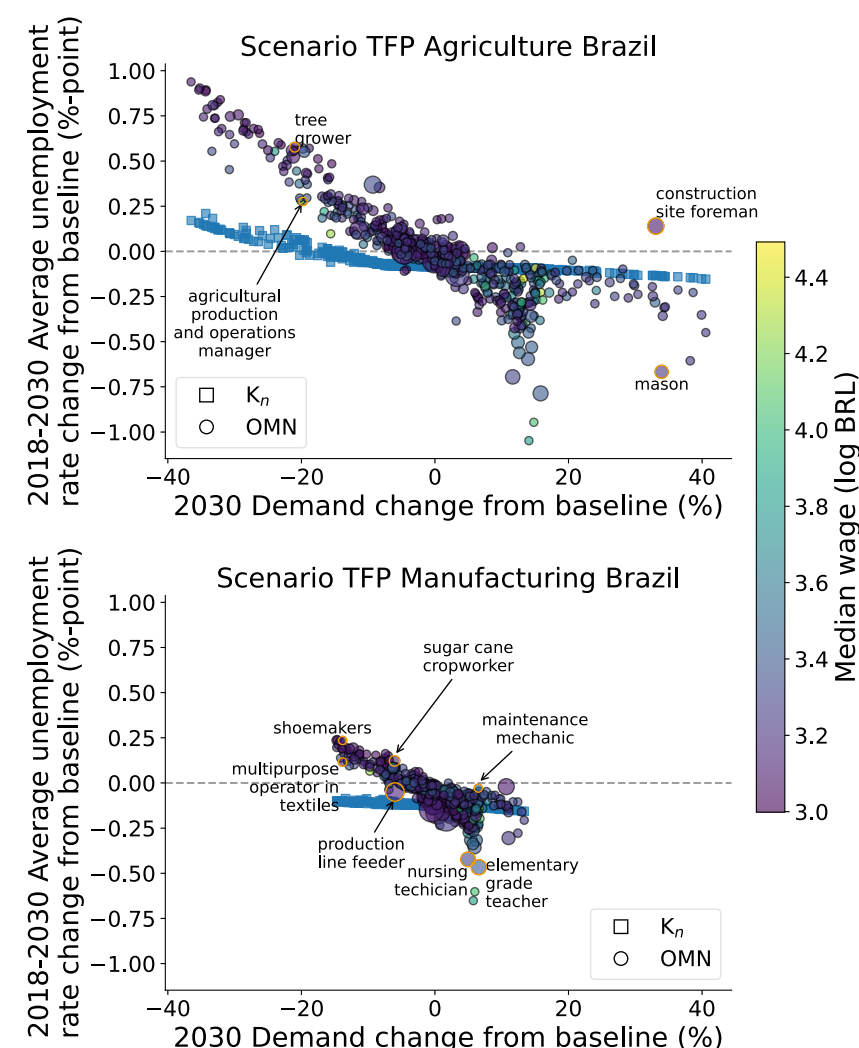
Usando a rede sem atrito, as mudanças na demanda de trabalho têm um impacto semelhante na taxa de desemprego para todas as ocupações – cerca de 0,13 pontos percentuais abaixo da linha de base para o cenário da TFP industrial e 0,08 pontos percentuais abaixo do cenário agrícola. Essa queda na taxa de desemprego se deve a um aumento

geral na demanda para os dois cenários de TFP em relação ao cenário de referência (ver Figura 65); há mais empregos disponíveis nos dois cenários de TFP e, como os desempregados são livres para se candidatar a qualquer vaga aberta em qualquer ocupação, eles o fariam até que as vagas abertas devido à demanda extra fossem preenchidas. As pequenas variações que vemos para ocupações que têm a mesma variação de demanda em 2030 em relação à linha de base se devem aos diferentes perfis dessa variação de demanda ao longo do cenário de 2018 até 2030. Isso é o que aconteceria se não houvesse fricções no mercado de trabalho.

Quando consideramos uma estrutura de mercado de trabalho mais realista usando a rede de mobilidade ocupacional, em ambos os cenários de TFP

vemos uma correlação negativa entre mudanças no desemprego e demanda de trabalhadores, como seria de esperar; em geral, um aumento na demanda de trabalho em relação ao cenário de referência resulta em uma diminuição na taxa de desemprego. Também podemos ver que, uma vez que consideramos os atritos de mobilidade, a maioria das ocupações experimenta uma queda menor – ou mesmo um aumento – na taxa de desemprego, e as ocupações que têm uma mudança semelhante na demanda de trabalho podem ver mudanças bastante diferentes na taxa de desemprego. Ou seja, a rede de mobilidade ocupacional mostra como os atritos do mercado de trabalho impedem alguns dos benefícios de emprego que os trabalhadores experimentaríamos em uma rede sem atritos.

Figura 67: Variação média de pontos percentuais na taxa de desemprego de 2018-2030 para cada ocupação com pelo menos 1.000 funcionários em 2018 para TFP Agrícola do Brasil (topo) e TFP Industrial do Brasil (parte inferior) em comparação com o cenário de referência, em relação à variação percentual na demanda para cada cenário de TFP em 2030 em comparação com a referência. Os círculos são a saída do modelo usando a rede de mobilidade ocupacional (OMN) e os quadrados usando a rede sem atrito (Kn). O tamanho de cada círculo é proporcional ao emprego em 2018 e a cor representa o logaritmo do salário médio mensal em BRL em 2018.



²⁰² A mudança real da demanda de 2018 a 2030 para cada cenário concorda com a mudança da demanda em 2030 em relação à linha de base quase inteiramente, com pequenas variações.

No painel superior da Figura 67, vemos os resultados para o cenário da TFP agrícola. Podemos ver claramente que os efeitos de rede afetam a taxa de desemprego de ocupações com uma mudança semelhante na demanda de trabalho de maneira bastante diferente. Por exemplo, os gerentes agrícolas e os arboricultores veem uma diminuição semelhante na demanda de 20% e 21%, respectivamente, mas os gerentes agrícolas têm um aumento na taxa de desemprego de 0,24 pontos percentuais, muito menor do que o aumento de mais de 0,57 pontos percentuais enfrentado por arboricultores. Uma causa dessa diferença é que os vizinhos dos arboricultores enfrentam uma queda maior na demanda do que os gerentes de agricultura; portanto, quando ocorre o choque de demanda, há menos oportunidades para os arboricultores encontrarem emprego em ocupações vizinhas.

Da mesma forma, tanto os capatazes quanto os pedreiros do canteiro de obras experimentam um aumento na demanda de cerca de 34% em relação ao cenário de referência. Os capatazes do canteiro de obras têm mais vizinhos do que os pedreiros, mas mais vizinhos podem significar que há mais competição por novos empregos criados por um choque de demanda e, portanto, a taxa de desemprego aumenta apesar de um aumento na demanda, como visto na Figura 67 para capatazes de canteiros de obras, mas não para pedreiros. Esses efeitos secundários diferenciados destacam os benefícios de considerar a rede de mobilidade ocupacional sobre a rede sem atrito.

No cenário da TFP industrial, também vemos os efeitos de rede. Sapateiros e operadores polivalentes na indústria têxtil sentem uma redução de cerca de 14% na procura de mão de obra, mas têm resultados de desemprego diferentes. Da mesma forma, professores do ensino fundamental e mecânicos de manutenção têm um aumento na demanda de trabalho de cerca de 6%, mas os professores do ensino fundamental veem uma das maiores quedas na taxa de desemprego em comparação com o cenário de referência. Em ambos os pares, a ocupação que está em melhor situação em comparação com a linha de base é a ocupação com mais vizinhos.

Também podemos identificar ocupações vulneráveis – ou seja, aquelas que terão maior aumento na taxa de desemprego, em relação ao cenário de referência em 2030. No nível de ocupação de quatro dígitos, que contém 621 ocupações, ocupações vulneráveis em ambos os cenários incluem auxiliares de construção civil, pedreiros, operadores de máquinas de tecelagem e trabalhadores agrícolas em oleaginosas. Os processadores de cigarros e tabaco também são vulneráveis no cenário agrícola, enquanto as ocupações no setor de fabricação de calçados (trabalhadores artesanais de calçados e artigos de couro e preparadores de calçados) correm o risco de aumentar o desemprego no cenário industrial. Essas ocupações vulneráveis seriam bons alvos para programas de requalificação para mitigar os impactos no mercado de trabalho de uma trajetória de transição verde.

Discussão

Comparando os efeitos do mercado de trabalho nos cenários da TFP industrial e da TFP agrícola, vemos que as mudanças absolutas na demanda por mão de obra são menores no choque da TFP industrial. Mais importante ainda, no cenário industrial, o número de ocupações que enfrentam mais desemprego (do que na linha de base) devido a dificuldades em alternar entre ocupações é menor (21%) do que no cenário agrícola (49%). Em outras palavras, nossos resultados sugerem que, de maneira geral, as mudanças na demanda por mão de obra resultantes de um aumento sustentado da produtividade na indústria permitem que trabalhadores mais afetados negativamente se desloquem de ocupações com demanda reduzida do que no cenário agrícola. Isso se deve em grande parte à diferença de magnitude das mudanças na demanda do mercado de trabalho em cada cenário, sendo também influenciada pela capacidade de adaptação dos trabalhadores. Além disso, conforme mencionado acima, embora as emissões no cenário da TFP industrial sejam menores do que na linha de base, elas são maiores do que na linha de base do cenário da TFP agrícola. Isso indica que dar maior atenção ao crescimento da produtividade industrial pode ajudar o Brasil a se alinhar com suas metas NDC e aumentar o número de empregos, bem como afetar negativamente menos ocupações.

A rede em nosso modelo é afetada por vários fatores, como diferenças nos conjuntos de habilidades necessários ou restrições geográficas, mas é importante observar que não abordamos a geografia explicitamente neste estudo de caso. Em vez disso, assumimos que existe um mercado de trabalho no qual todos os trabalhadores podem se candidatar a empregos e, embora as restrições geográficas estejam implícitas na rede de mobilidade ocupacional (uma vez que as ocupações geograficamente concentradas estarão mais conectadas umas às outras), não podemos considerar a papel da geografia separadamente de outros efeitos, como conjuntos de habilidades, diferenças salariais, preconceitos raciais e de gênero, etc. Como a realocação de trabalhadores é uma consideração importante para os cenários CGE, adicionar geografia ao modelo é uma melhoria importante para trabalhos futuros.

Outra consideração para pesquisas futuras é combinar o modelo do mercado de trabalho com o modelo que usamos para a demanda – neste caso, o CGE e o modelo de uso da terra. Atualmente, o modelo CGE é executado independentemente do modelo do mercado de trabalho e, portanto, os atritos do mercado de trabalho que retardam a realocação de trabalho não são levados em consideração nas etapas de tempo subsequentes. Um acoplamento dos dois modelos será capaz de mostrar o quanto as fricções do mercado de trabalho podem desacelerar, ou permitir, a transição para o zero líquido. Permitir um comportamento mais realista fora de equilíbrio no modelo macroeconômico seria outro caminho para pesquisas futuras.

O conjunto de ocupações que usamos em nossa análise é constante; o modelo trata apenas de ocupações já existentes, especificamente dentro do sistema de classificação de ocupações do CBO de 2002. Os dados que usamos também funcionam dentro desse sistema de classificação e, portanto, a pesquisa sobre a criação de novos empregos é outra questão interessante de pesquisa futura.

Por fim, os dados da RAIS que utilizamos para calcular a rede de mobilidade ocupacional captam apenas a força de trabalho formal, que no Brasil representa cerca de 67% do total.²⁰³ Isso deve ser levado em consideração na interpretação desses resultados e, em trabalhos futuros, podemos conciliar os dados da RAIS com os dados da mão de obra informal, como, por exemplo, dados da pesquisa domiciliar da PNAD.

Neste estudo de caso, combinamos os cenários propostos por Ferreira-Filho e Hanusch (2022) para investigar os impactos dos aumentos da produtividade total dos fatores na economia do Brasil com um modelo de mercado de trabalho mais realista para mostrar os impactos desses cenários sobre o desemprego no nível de ocupação. No entanto, essa abordagem modelística também pode ser usada para informar muitos outros aspectos das políticas de transição de baixo carbono. Por exemplo, podem-se investigar como o aumento da velocidade da transição para o zero líquido repercute sobre o mercado de trabalho no nível da ocupação. Da mesma forma, nossa abordagem de modelagem pode informar os formuladores de políticas sobre as implicações de diferentes escolhas tecnológicas para o mercado de trabalho e a requalificação necessária para as diferentes opções de transição.

²⁰³ Ulysega, G. (2018). Firms, Informality and Development. The American Economic Review 108.8 <https://doi.org/10.1257/aer.20141745>

ESTUDO DE CASO:

A China e as consequências sociais da transição do carvão

ALEX CLARK (UNIVERSIDADE DE OXFORD) E WEIRONG ZHANG (UNIVERSIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DO NORTE DA CHINA)

Questão de política: Quais são os efeitos fiscais e de emprego da eliminação gradual da energia a carvão na China?

Região: China

Método: Microsimulação

Principais conclusões: Em um cenário de referência consistente com a meta de neutralidade de carbono da China, o emprego sustentado pelo carvão diminui de 2,7 milhões em 2021 para 1,4 milhão em 2035 e 94.000 em 2050. A taxa anual de perda de receita tributária aumenta para mais de 10% até a década de 2040. No entanto, dados os níveis atuais de subsídios, é provável que o carvão já seja um dreno fiscal líquido. As principais áreas produtoras de carvão da China, como a Mongólia Interior, enfrentarão desafios significativos, a menos que se diversifiquem com sucesso.

Engajamento: O desenvolvimento deste estudo de caso se beneficiou da colaboração com a Iniciativa de Rastreamento de Carbono (*Carbon Tracker Initiative*) e pesquisadores da Universidade de Energia Elétrica do Norte da China, e foi concluído com o apoio do Instituto International Institute de Análise de Sistemas Aplicada (International Institute for Applied Systems Analysis - IIASA). Em coordenação com a Embaixada Britânica em Pequim, este estudo foi amplamente disseminado na China para um público incluindo várias outras embaixadas, fundações, organizações internacionais, atores da sociedade civil e funcionários do governo.

Resumo: Os autores empregam um modelo de simulação dinâmico para investigar como a eliminação gradual do carvão – uma escolha tecnológica – pode afetar o emprego e as receitas fiscais do setor de carvão ao longo do tempo e no espaço. O modelo de simulação dinâmica de nível micro do setor de carvão utiliza dados de ativos detalhados num nível mais alto do que o implícito na agregação regional frequentemente necessária para a modelagem de nível macro, superando a falta de microdados de alta qualidade requeridos para rodar modelos empiricamente robustos.

Introdução

A China enfrenta um desafio estrutural sem precedentes de eliminar gradualmente o uso de carvão em sua economia doméstica. O consumo de carvão da China, cerca de quatro bilhões de toneladas por ano, é quatro vezes maior que o do segundo maior consumidor, a Índia, e sustenta a maior parte de sua geração de eletricidade e produção industrial pesada. Se a China atingir sua meta de longo prazo de neutralidade de carbono até 2060, o papel do carvão como fonte de energia diminuirá para uma fração de seu nível atual nas próximas décadas. Conseguir isso requer a adoção, em larga escala, de uma combinação de energias renováveis, eletrificação, combustíveis sintéticos à base de hidrogênio, medidas de eficiência energética e, muito provavelmente, captura e armazenamento de carbono juntamente com outras tecnologias de remoção de carbono.

Essas mudanças estruturais e tecnológicas terão profundas consequências para a composição da economia chinesa em todos os níveis. Pesquisadores e formuladores de políticas precisam ser capazes de analisar em detalhes como essas mudanças ocorrerão no espaço e no tempo em toda a cadeia de valor do carvão, bem como na economia em geral. Considerando a formulação de políticas para gerir o impacto socioeconômico e distributivo dessas mudanças, destacam-se dois aspectos fundamentais: o efeito da eliminação da energia a carvão no emprego no setor do carvão e o impacto nas receitas fiscais do setor.

Em seu estudo *Estimating the Employment and Fiscal Consequences of Thermal Coal-Out in China*, Clark e Zhang (2022)²⁰⁴ se propuseram a responder a essas questões, que são intimamente relacionadas. Devido a limitações de dados no momento de sua realização, o estudo dos autores se concentra apenas no carvão térmico (para geração de eletricidade), que representa cerca de metade do consumo total de carvão da China.²⁰⁵

Abordagens para modelar mudanças estruturais

Tradicionalmente, uma mudança econômica estrutural dessa natureza e seus efeitos sobre o emprego e a arrecadação de impostos seriam analisados sob a ótica da modelagem macroeconômica baseada no equilíbrio a partir de tabelas de insumo-produto que descrevem as redes de produção-consumo.²⁰⁶ Esses modelos são projetados para capturar efeitos de substituição entre setores em resposta a mudanças nos preços e na demanda e para incorporar taxas de mudança tecnológica, mas geralmente não capturam a dinâmica de setores específicos em um nível alto de especificidade. Eles contam com um grau significativo de agregação regional e uma série de suposições quantitativas que não são necessariamente precisas e são difíceis de validar em contextos com poucos dados sujeitos a políticas de comando e controle e mercados altamente regulamentados, como é o caso da China (por exemplo, elasticidade de preços, crescimento da demanda, formação de preços, etc). Abordagens mais recentes usam análise de rede para entender como os mercados de trabalho se adaptam às mudanças no nível micro – mas os modelos correspondentes dependem de dados detalhados e de alta qualidade no nível micro, como conjuntos de dados vinculados de empregadores-empregados.^{207 208}

No caso da China, os dados necessários para rodar modelos de rede empiricamente robustos não estão disponíveis, em sua maioria, para pesquisadores que atuam fora do governo chinês. Além disso, a maioria dos modelos econômicos convencionais não são capazes de lidar com dados em nível micro sem alguma forma de agregação, produzindo resultados com precisão relativamente baixa. Portanto, a modelagem macro não é sensível e a modelagem de rede não é viável.

²⁰⁴ Clark, A. and Zhang, W. (2022). Estimating the Employment and Fiscal Consequences of Thermal Coal Phase-Out in China. *Energies* (Basel), 15(3): 800. doi:10.3390/en15030800.

²⁰⁵ A maior parte do consumo de carvão da China para outros fins que não a geração de eletricidade é usada para gerar calor, principalmente para processos industriais, como produção de aço e cimento, com uma proporção pequena e cada vez menor ainda sendo usada para aquecimento doméstico. No momento em que este estudo foi realizado, a disponibilidade de dados limitava o escopo apenas à energia térmica. Desde então, a Iniciativa de Finanças Espaciais (Spatial Finance Initiative) da Universidade de Oxford publicou conjuntos de dados em nível de ativos para os setores de aço e cimento que podem facilitar a expansão desse modelo para cobrir uma parcela muito maior do consumo total de carvão da China.

²⁰⁶ Mercure, J.-F. et al. (2018). Macroeconomic Impact of Stranded Fossil Fuel Assets. *Nature Climate Change*, 8(7): 588-593. doi:10.1038/s41558-018-0182-1.

²⁰⁷ del Rio-Chanona, R. M. et al. (2020). Supply and Demand Shocks in the COVID-19 Pandemic: An Industry and Occupation Perspective. *Oxford Review of Economic Policy*. doi:10.1093/oxrep/graa033.

²⁰⁸ Mealy, P. (2018). Know What? New Lenses on Productive Knowledge Shed Light on Long Run Development, Structural Change, Job Switching and the Transition to the Green Economy. In J. D. Farmer & C. Hepburn (Eds.).

Desenho do Modelo, Dinâmica e Limitações

Dadas essas restrições, em vez de prever qual seria o caminho mais provável, este estudo usa uma abordagem de microsimulação para modelar a dinâmica do setor de carvão. O estudo estima a magnitude e a distribuição de empregos e receitas fiscais gerados pelo setor de carvão térmico (tanto geograficamente quanto entre cadeias de valor e empresas) e como eles mudam ao longo do tempo.

Usando conjuntos de dados no nível dos ativos sobre as usinas de carvão e minas de carvão da China, complementados por uma série de dados de fontes independentes e de suposições sobre emprego no transporte de carvão, taxas de utilização das plantas, nível de impostos e melhorias de produtividade, o setor de carvão é modelado de forma independente de outros setores e considerando a demanda final de carvão como determinada exogenamente em função da política climática da China.

O modelo orientado pela demanda é construído de baixo para cima, incorporando dados específicos de localização das usinas de carvão térmico na China e vinculando-os a dados sobre a capacidade instalada de minas de carvão nas províncias. As estimativas de emprego e receitas fiscais são sobrepostas nesta rede e evoluem ao longo do tempo, com base nas mudanças na atividade das usinas de carvão. As diferenças no tipo de carvão e a distância física entre minas e usinas também são consideradas, permitindo que a dimensão do transporte de carvão seja adicionada à análise. Por motivos de qualidade de dados mencionados acima, as usinas não estão vinculadas a minas específicas nesta iteração do modelo, embora, à medida que os pesquisadores desenvolvam uma maior compreensão dos determinantes das relações mina-planta (por exemplo, distância, custo de transporte, mina compartilhada e propriedade da usina), essa dimensão possa ser incorporada de forma simples.

Consistente com o arcabouço da análise de risco-oportunidade desenvolvido em Mercure et al. (2020),²⁰⁹ o modelo é desenhado para lidar com mudanças não marginais, mantendo-se – nesta iteração – agnóstico sobre substituição e efeitos de preço resultantes de mudanças na

demanda. Isso não quer dizer que esses efeitos não sejam relevantes para o caso chinês, mas sim que é preciso ter cautela diante da realidade de mercados fortemente regulamentados, bem como da incerteza fundamental sobre a formação de preços, elasticidades e detalhes dos contratos de fornecimento de carvão. À medida que a disponibilidade de informações aumenta, esse modelo certamente pode ser aprimorado para refletir um maior conhecimento sobre essas dinâmicas que são críticas.

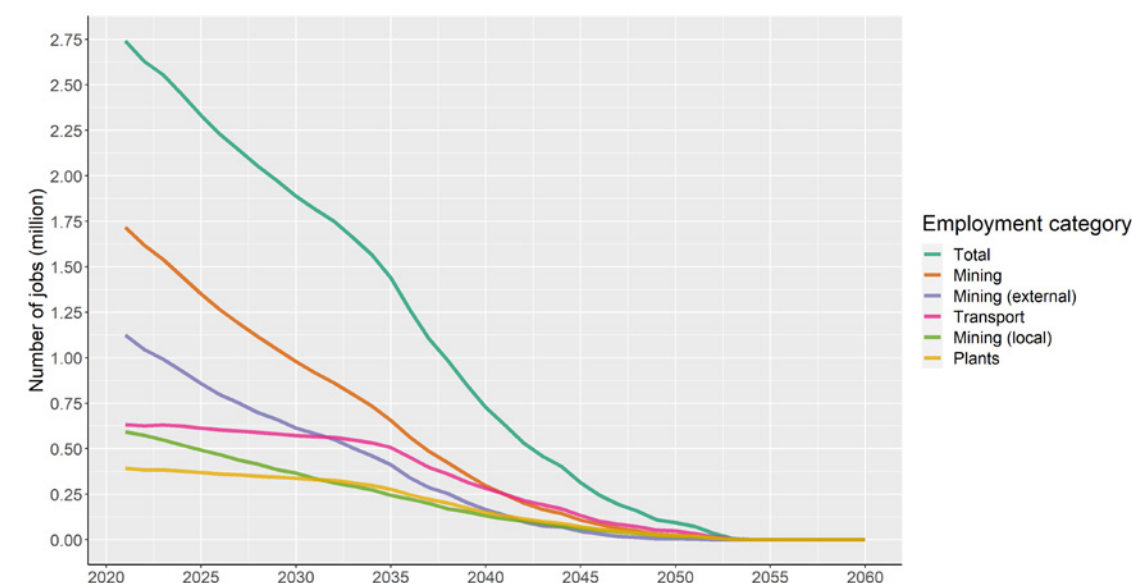
Resultados

Modelamos um cenário de referência como aquele em que as usinas existentes operam conforme planejado para suas vidas úteis de 30 anos e são então desativadas; todas as usinas atualmente aprovadas são construídas (enquanto aquelas que estão atualmente planejadas, mas não aprovadas, não são construídas); e a indústria de mineração não tem uma fonte alternativa de demanda de carvão térmico.²¹⁰ Essas condições resultam em uma eliminação gradual da energia a carvão em meados da década de 2050. Quaisquer usinas a carvão que estão se aposentando são substituídas não por nova energia a carvão, mas por fontes de energia limpa de baixo custo.

O modelo é executado para quatro outros cenários: um cenário sem transição (*no transition* – NT), no qual todas as usinas planejadas são construídas e operam por toda a vida útil, independentemente do status de aprovação; e três cenários adicionais que refletem políticas climáticas mais ambiciosas, calibradas para corresponder aproximadamente às trajetórias de capacidade de carvão modeladas por He et al. (2020).²¹¹ O cenário R reflete uma maior concorrência de energias renováveis de baixo custo, e os cenários C50 e C80 exigem reduções de 50% e 80% nas emissões de energia movida a carvão até 2030 em relação a 2015, respectivamente. Cenários progressivamente mais rigorosos implicam uma maior queda de curto prazo na capacidade de carvão e uma eliminação mais rápida da frota restante.

No cenário de referência, a continuação das tendências históricas de crescimento da produtividade do trabalho no setor de mineração de carvão implica a perda de empregos para a

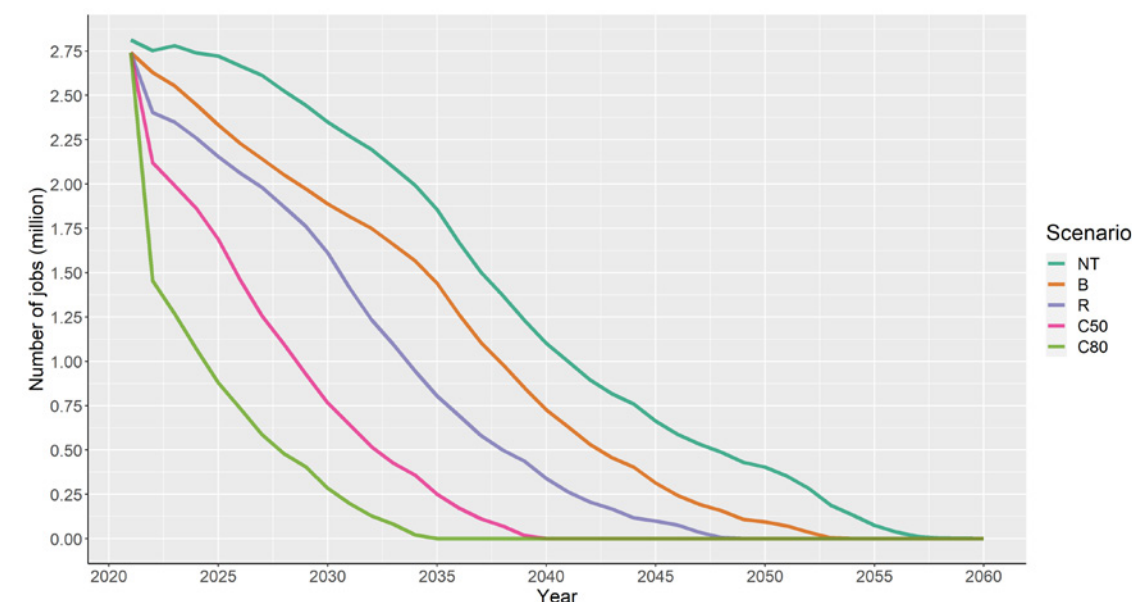
Figura 68: Emprego nos setores de mineração, energia e transporte de carvão térmico no cenário referência, 2021–2060.



eficiência no médio prazo. O emprego sustentado pelo consumo de carvão térmico cai de 2,7 milhões em 2021, para 1,4 milhão em 2035 e 94.000 em 2050. O total de empregos na mineração é separado entre os gerados pelo consumo de carvão na mesma província onde o carvão é extraído (“local”) e consumo de carvão em outras províncias (“externo”). Em ambas as categorias, o número de mineradores de carvão enfrentando redundância sozinhos, mesmo sem nenhuma alteração na linha de base da política existente, deverá exceder 1,1 milhão até 2025 (consulte a Figura 68).

Como mostra a Figura 69, o impacto do cenário R no emprego total é limitado até o final da década de 2020, mas seu impacto marginal sobre a linha de base aumenta para 630.000 empregos em 2035, antes de diminuir novamente – com lacunas muito maiores para C50 e C80. Por outro lado, um cenário NT protegeria apenas 500.000 trabalhadores da redundância até 2030 e o emprego ainda cairia 40% até 2040 e 85% até 2050.

Figura 69: Emprego nos setores de mineração, energia e transporte de carvão térmico em cinco cenários de eliminação do carvão, 2021–2060.



²⁰⁹ Mercure, J.-F. et al. (2020). Risk-Opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal. *Global Environmental Change* 70: 102359.

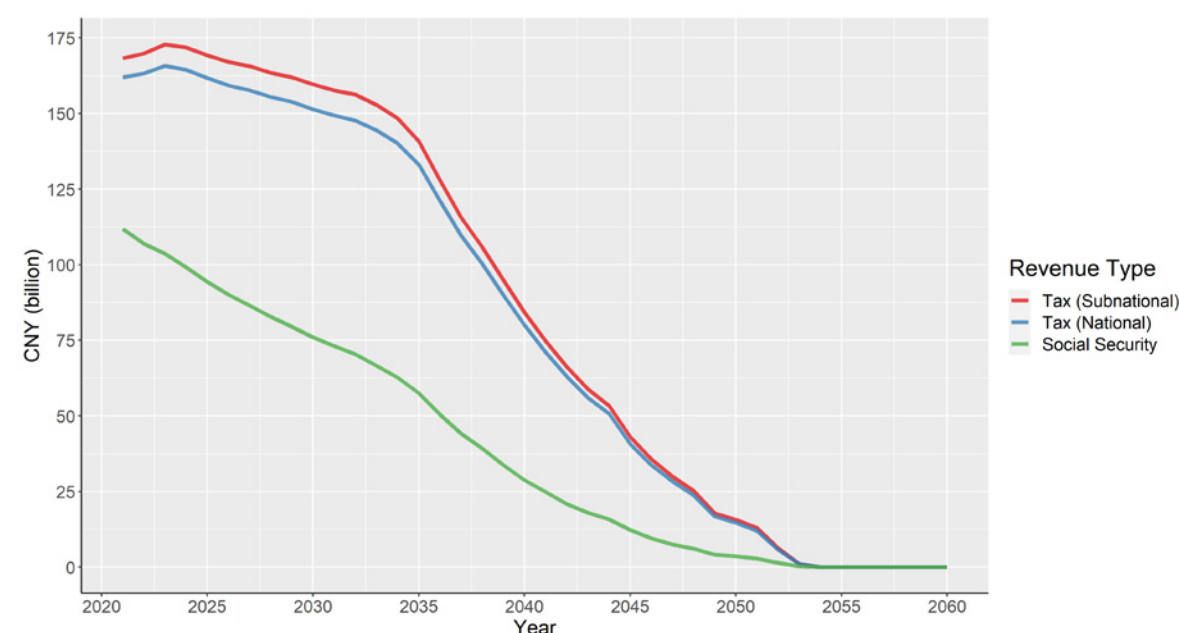
²¹⁰ É possível, mas improvável, que usos alternativos em larga escala para o carvão térmico sejam encontrados na China, assumindo que o país continue a exportar apenas uma modesta parcela de sua produção total de carvão. Isso pode levar ao fechamento total de minas exclusivamente produtoras de carvão térmico, principalmente aquelas que abastecem usinas específicas. No entanto, enquanto muitas minas de carvão produzem carvão térmico ou de coque (metalúrgico), algumas minas produzem ambos os tipos e podem ser menos afetadas pela eliminação do carvão térmico apenas. Resta saber se a demanda da China por carvão metalúrgico diminuirá a uma taxa semelhante à do carvão térmico ou se a descarbonização do uso de carvão industrial será atrasada em comparação.

²¹¹ He, G. et al. (2020). Rapid Cost Decrease of Renewables and Storage Accelerates the Decarbonization of China's power system. *Nature Communications*, 11(1): 1–9.

A contribuição do carvão térmico para as receitas tributárias no mesmo cenário totaliza aproximadamente CNY 300 bilhões anualmente de 2021 a 2030 (com um adicional de CNY 110 bilhões em contribuições para a previdência social), atingindo um pico em 2023 em CNY 340 bilhões (ver Figura 3). Com subsídios totais, não incluindo externalidades de gases

de efeito estufa ou incluindo totalmente externalidades de poluição local, estimados na casa de CNY 480 bilhões anuais (com base em uma pesquisa detalhada da literatura disponível sobre subsídios diretos e indiretos em toda a cadeia de valor modelada no estudo), o setor de carvão térmico já será, sozinho, um dreno fiscal líquido nas finanças públicas da China.

Figura 70: Composição das receitas tributárias (nacionais e subnacionais) e previdenciárias geradas pelo setor de carvão térmico, 2021-2060, cenário de referência.



À medida que as usinas de carvão começam a ser aposentadas em maior número em meados da década de 2030, as receitas fiscais caem rapidamente, com a taxa anual de perda de receita tributária subindo de 1% na década de 2020 para mais de 10% na década de 2040. Com as suposições para a política futura da China sobre o carvão se tornando mais rígidas, as perdas de empregos e receitas fiscais são antecipadas no tempo. Sob uma política reconhecidamente improvável de nenhuma transição (NT), na qual todas as usinas de carvão atualmente planejadas são construídas, essas perdas são adiadas, mas não evitadas.

As receitas fiscais acompanham o consumo total de carvão, de modo que os cenários B e NT apresentam pico de receita em 2023 (CNY 339 bilhões) e 2027 (CNY 399 bilhões), respectivamente. A base tributária permanece estável até 2030, mesmo sob o cenário R, caindo apenas 17% até a década de 2020 e diminuindo rapidamente a partir de então. Os cenários C50 e C80 apresentam uma taxa de declínio semelhante, mas antecipada em 10 a 11 anos e 15 a 16 anos, respectivamente, em comparação com o cenário de referência. Isso reflete a intensidade de capital da base tributária: as quedas na receita tributária são causadas quase inteiramente pela aposentadoria da capacidade.

A avaliação desses resultados no nível das províncias sugere que as áreas produtoras de carvão responsáveis por grande parte da produção, quais sejam, a Mongólia Interior, Shanxi, Shaanxi e Xinjiang, enfrentarão desafios significativos na gestão dos efeitos localizados das perdas de emprego esperadas e na reorientação da oferta de mão de obra para outras atividades. Com indústrias dependentes das exportações de carvão, essas províncias são relativamente eficientes em termos de mão de obra, mas seu alto nível de exposição à demanda de carvão em declínio implica um rápido colapso nas receitas fiscais dos governos provinciais na década de 2030, a menos que esses diversifiquem suas fontes com sucesso.

No nível da empresa, a demanda de carvão das empresas de energia estatais chamadas de “Big Five” sustenta 40% dos empregos nacionais e das receitas fiscais do carvão térmico em 2021. Os empregos sustentados pelas atividades das 10 maiores empresas em todo o país – com uma exceção – cairá cerca de 70-85% no início da década de 2040, enquanto a receita tributária gerada pelo consumo de carvão de cada empresa cairá cerca de 45-70%.

Conclusões da política

Este trabalho produz pelo menos duas conclusões políticas importantes, a serem refinadas e testadas em pesquisas futuras. Primeiro, milhões de empregos no setor de carvão térmico da China estão em risco nas próximas décadas, mas a não adoção de políticas de descarbonização provavelmente terá um impacto limitado na magnitude e na distribuição dos empregos perdidos, porque a maioria dessas perdas é causada pela consolidação e pela automação. Só os cenários de política de descarbonização mais agressivos (C50 e C80) resultam num aumento significativo da perda de postos de trabalho, em particular na década de 2020. A perspectiva de perdas de empregos em larga escala no setor de carvão é, portanto, uma consideração política importante, mas não é em si uma razão para adiar medidas de transição para baixo carbono, especialmente no contexto de expansão do emprego em outros setores e economia de custos resultante de uma transição rápida.²¹² O estudo de caso Renováveis Imparáveis e Preços Marginais na China, Índia e Brasil constata que um cenário em que a transição para energia limpa é acelerada tem resultados mais positivos para o emprego e o PIB na China do que um cenário de transição tardia.

Em segundo lugar, as perdas nas receitas fiscais decorrentes do declínio das atividades do setor de carvão também não são motivo para adiar a transição, porque é muito provável que sejam mais do que compensadas pelas economias feitas pela redução dos subsídios pagos ao setor, mesmo sem considerar as externalidades dos gases de efeito estufa. No entanto, grandes variações no impacto fiscal líquido de curto e longo prazo nas províncias constituem um forte argumento para que medidas redistributivas sejam tomadas pelo governo central. Qualquer economia fiscal líquida da eliminação gradual do carvão nas províncias menos expostas poderia ser usada para substituir temporariamente as perdas sentidas pelas províncias mais expostas à medida que reposicionam e/ou diversificam sua base tributária, facilitando seu caminho durante a transição.

Olhando para o futuro: a utilidade de uma lente do tipo bottom-up

A análise no nível da planta permite que o usuário identifique os principais drivers (do lado da demanda) de empregos e receitas fiscais do setor de carvão com um alto nível de precisão, tanto em termos da localização quanto da propriedade de ativos. Considerar os fluxos de carvão através das fronteiras provinciais também permite analisar como a demanda em uma província pode sustentar o emprego e a receita tributária em outra.

O modelo também permite avaliar muitos tipos diferentes de política de demanda e oferta, com base em seu impacto na demanda de plantas individuais ou no fornecimento de minas individuais. Os cenários para a demanda futura de carvão podem ser calibrados de várias maneiras, seja ajustando a vida útil de cada usina/mina de carvão e sua taxa de utilização/produção diretamente, seja simulando o efeito de políticas locais ou nacionais para controlar as emissões oriundas do setor de geração de energia a carvão ou de produção de carvão (podendo, por exemplo, ter foco primeiro em usinas menos eficientes). Da mesma forma, os pressupostos e os cálculos para estimar o emprego e as receitas fiscais associados a mineração, transporte e uso de carvão podem ser facilmente ajustados em resposta a informações novas ou atualizadas sobre vários aspectos da cadeia de valor do setor de carvão.

Embora o modelo existente cubra apenas o uso de carvão no setor de energia, ele também pode ser expandido para incluir o uso de carvão na indústria pesada (principalmente para fabricação de aço e cimento), ao passo que a abordagem modelística também pode ser expandida para outras partes do setor de energia, incluindo a geração de energia não baseada no carvão e a extração e uso de petróleo e gás (embora neste último caso haja uma dimensão internacional muito maior).

Este modelo é relativamente simples em sua construção e lógica e não examina como declínios no emprego e nas receitas fiscais no setor de carvão podem ser compensados por ganhos com a substituição do carvão por outras fontes de energia. Essas questões talvez sejam mais bem respondidas por outras abordagens de modelagem usando análise de redes e tabelas de insumo-produto, mas a abordagem de microssimulação empregada aqui pode complementar outras ou ser usada como um meio de comparar resultados e calibrar a dinâmica das respostas a estímulos externos.

Por exemplo, pode ser usada para identificar como trajetórias “ótimas” para a eliminação do carvão identificadas por meio de modelagem macroeconômica (por exemplo, com base na geração de energia de menor custo) podem divergir dos resultados das políticas do tipo top-down que continuam a desempenhar um papel importante na determinação da demanda de carvão na China. Um diálogo com os resultados de outros modelos pode ajudar a identificar onde os resultados podem ser irreais ou implicar mudanças sem precedentes na composição do setor de carvão em diferentes províncias e regiões da China. Por último, mas não menos importante, a alta precisão da análise também pode ajudar a antecipar fontes de resistência política, econômica ou de outra natureza à mudança, com base em locais vulneráveis, interesses arraigados, incentivos político-econômicos ou outros fatores.

²¹² Ver Way, R. et al. (2022). Empirically Grounded Technology Forecasts and the Energy Transition. *Joule*, 6(9): 2057-2082. doi:https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.009.

ESTUDO DE CASO:

Impactos econômicos da economia de emissão zero na Índia em 2070

MICHAEL MCGOVERN (CAMBRIDGE ECONOMETRICS), PIM VERCOULEN (CAMBRIDGE ECONOMETRICS & UNIVERSIDADE DE EXETER), FEMKE NIJSSE (UNIVERSIDADE DE EXETER), JEAN-FRANCOIS MERCURE (BANCO MUNDIAL)

Questão de política: Quais são os impactos macroeconômicos de atingir o zero líquido na Índia até 2070?

Regiões: Índia

Método: E3ME- FTT: Geração de Energia

Principais conclusões: (1) A energia solar se torna uma tecnologia dominante até 2070, cobrindo uma parcela de 57% da demanda de energia primária, possibilitada pela eletrificação de muitas tecnologias de uso final; (2) a transição para uma economia de zero líquido provavelmente leva a impactos macroeconômicos líquidos positivos para a Índia, onde o PIB pode crescer mais US\$ 840 bilhões até 2070 em comparação com o cenário de referência; (3) a transição para o zero líquido provavelmente levará a uma perda de empregos nos setores relacionados a combustíveis fósseis, com mais de 2 milhões de empregos em risco; e (4) a transição para o zero líquido deve promover a criação de empregos em outros setores, como geração de energia, construção e serviços.

Engajamento: Este estudo de caso surgiu e evoluiu de várias atividades de engajamento com *stakeholders* indianos organizadas pelo The Energy Research Institute (TERI) ao longo da execução do Projeto EEIST.

Resumo: Os autores usam o modelo E3ME- FTT: Geração de Energia para explorar as prováveis configurações futuras do sistema de energia na Índia, com interesse especial na combinação de políticas voltadas para os principais setores intensivos em energia visando para alcançar o zero líquido. O modelo emprega mecanismos de autorreforço de adoção de tecnologia e explora os impactos combinados de uma série de políticas, incluindo: (i) precificação do carbono, (ii) investimentos em eficiência energética, (iii) cotas para mistura de biocombustíveis, (iv) impostos e subsídios sobre veículos, (v) imposto rodoviário, (vi) imposto sobre combustível, (vii) cotas para veículos elétricos, (viii) regulações mirando a eliminação gradual de processos intensivos em carbono, (ix) subsídios a investimentos em processos de baixo carbono, (x) investimentos estratégicos em energia, e (xi) tarifas do tipo *feed-in*.

Introdução

Com a população,²¹³ economia e padrões de vida em crescimento²¹⁴ e uma alta dependência tanto do carvão quanto de importações de energia,²¹⁵ a Índia enfrenta muitos desafios para cumprir sua promessa de atingir emissões líquidas zero até 2070. Uma quantidade substancial de emissões pode ser lançada se a demanda futura for atendida por meio das cadeias de suprimentos atuais usando os sistemas de energia atuais. A redução dessas emissões seria necessária para limitar o aquecimento global bem abaixo de 2° C. No entanto, a mitigação das mudanças climáticas não precisa ter um custo líquido e pode oferecer oportunidades para algumas regiões e riscos para outras.²¹⁶ A Índia é um importador de combustíveis fósseis e, em um cenário de zero líquido, sua balança comercial de energia provavelmente melhorará. Além disso, a transição para zero líquido aquece a atividade econômica e leva a empregos adicionais, substituindo empregos nos setores de combustíveis fósseis (principalmente abastecimento de carvão). Os modelos podem fornecer informações sobre como a Índia poderia atingir o zero líquido até 2070, tanto do ponto de vista de uma boa combinação de tecnologias, quanto de quais são os resultados esperados das políticas. Uma mudança de grande envergadura como esta será um risco para alguns agentes econômicos e uma oportunidade para outros. Aqueles empregados em indústrias relacionadas a combustíveis fósseis provavelmente perderão seus empregos (por exemplo, mineração de carvão) ou verão a natureza de seu emprego mudar (por exemplo, fabricação de veículos).

Neste estudo de caso, investigamos um cenário de descarbonização e comparamos os resultados com um cenário de referência usando o E3ME- FTT. O cenário de referência está alinhado com um “cenário de políticas vigentes”. O cenário zero líquido a ser apresentado aqui é apenas um dos caminhos virtualmente infinitos para a economia

da Índia alcançar o zero líquido até 2070. Uma característica fundamental do E3ME-FTT é que ele não é um modelo de otimização que assume que as economias operam em (ou próximo de) equilíbrio com alocação perfeita de recursos. Com frequência a capacidade ociosa pode ser representada para estimular mudanças. Isso pode vir na forma de força de trabalho subutilizada ou investimentos adicionais sendo disponibilizados sem excluir investimentos em outros lugares (por exemplo, por meio de empréstimos), entre outros. Além disso, o E3ME-FTT permite simular uma infinidade de políticas além da precificação do carbono. Isso permite testar os efeitos de diferentes combinações de políticas e ver quais são mais eficazes na redução de emissões e na geração de resultados econômicos positivos.

A Tabela 11 mostra uma visão geral das políticas implementadas para atingir o zero líquido até 2070 na Índia, simulando pacotes de políticas semelhantes para todas as outras regiões do mundo. É improvável que qualquer país se comprometa com um pacote de políticas tão rigoroso sem que outras grandes economias também se comprometam com metas semelhantes. O pacote de políticas consiste em políticas de penalização do carbono, como precificação do carbono ou regulações de eliminação gradual de tecnologias intensivas em energia, e de políticas de promoção de baixo carbono, como subsídios. Esse pacote de políticas foi desenvolvido na base de tentativa e erro, uma vez que o E3ME-FTT é uma ferramenta de simulação. A simulação não garante o resultado desejado; apenas apresenta o resultado provável. Uma versão inicial desse pacote de políticas foi desenvolvida para investigar ativos de combustíveis fósseis ociosos devido a estratégias de descarbonização e extração.²¹⁷ Embora sejam possíveis inúmeras variações no pacote apresentado, esforços anteriores mostraram que, em essência, todos os instrumentos de políticas precisam ser usados para atingir uma meta estrita como o zero líquido.

²¹³ United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2022). World Population Prospects 2022: Summary of Results.

²¹⁴ OECD. (2023). Real GDP long-term forecast (indicator). doi: 10.1787/d927bc18-en (Accessed on 06 January 2023)

²¹⁵ IEA. (2020). India 2020 Energy Policy Review. IEA Energy Policy Reviews. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9faa9816-en>.

²¹⁶ Mercure, J. F., et al. (2021). Reframing Incentives For Climate Policy Action. Nature Energy, 6(12): 1133-1143.

²¹⁷ Mercure, J. F., et al. (2021). Reframing Incentives for Climate Policy Action. Nature Energy, 6(12): 1133-1143.

Tabela 11: Lista de políticas implementadas para simular o zero líquido até 2070 na Índia.

Setores	Política	Detalhes da política
Múltiplo	Precificação do carbono	Começa em US\$ 40/tCO2 em 2024 e aumenta para US\$ 325 \$/tCO2 em 2070 (valores de 2022)
	Investimentos em eficiência	Redução específica do setor na demanda final de energia
	Cotas para mistura de biocombustíveis	Misturar, por exemplo, bioetanol com gasolina, afetando todas os meios de transporte à base de gasolina
Transporte rodoviário	Imposto sobre veículos	Aumento do imposto de registro de veículos movidos à combustão (ICEVs) a partir de 2024
	Subsídio de veículos	Subsídios no preço de compra de veículos elétricos (EVs) a partir de 2024
	Pedágio	Aumento do imposto de circulação sobre ICEVs a partir de 2024
	Imposto sobre combustível	Aumento do imposto de combustível sobre produtos petrolíferos a partir de 2024
	Regulamento de eliminação gradual	Proibição da venda de ICEVs. Modelos de veículos a combustão ineficientes (mais antigos) são banidos em 2024. Modelos de ICEVs mais eficientes são banidos em 2040.
	Cotas para EVs	Forçar os fabricantes a oferecer um determinado número mínimo de EVs em seu portfólio
Geração de energia	Subvenção ao investimento	A partir de 2024, é aplicado um subsídio de 20% para energia nuclear, um subsídio de 50% para aplicações CCS e um subsídio de 60% para BECCS
	Regulação mirando eliminação gradual	A energia do carvão é gradualmente eliminada até 2060. A geração ininterrupta de energia a partir de combustíveis fósseis não pode aumentar de 2028 em diante
	Investimento público estratégico	Investimentos estratégicos em BECCS entre 2024 e 2026 para alimentar o sistema
	Tarifa <i>feed-in</i>	Tarifas <i>feed-in</i> sobre energia eólica de 2024 a 2036, com eliminação total até 2046
Aquecimento residencial	Regulação mirando eliminação gradual	Proibição de vendas de sistemas de aquecimento doméstico movidos a combustíveis fósseis a partir de 2024
	Imposto sobre combustível	Um imposto sobre o combustível em linha com os impostos sobre o carbono
	Subsídios ao investimento	Subsídios a compressores e aquecedores solares térmicos a partir de 2024
Siderurgia	Subsídios ao investimento	A partir de 2024, é aplicado um subsídio de 10% no investimento inicial de aplicações CCS e um subsídio de 50% em outras tecnologias primárias de baixo carbono
	Subsídios de energia	O uso de hidrogênio (50%) e eletricidade (25%) é subsidiado de 2024 a 2046, seguido por uma eliminação gradual até 2057
	Investimento público estratégico	Investimentos estratégicos em siderurgia baseada em hidrogênio de 2024 a 2032 e em métodos de eletrólise de 2035 a 2039 para alimentar o sistema.
Uso da terra	Mitigação de emissões de uso da terra (baseado em suposição)	A mitigação das emissões do uso da terra inclui emissões reduzidas da agricultura, reflorestamento, reflorestamento e outras medidas baseadas no uso da terra.

Descrição do E3ME-FTT

Descrição do E3ME

O E3ME é um modelo computacional dos sistemas econômicos e energéticos do mundo e do meio ambiente. Nele, a atividade econômica realizada por pessoas, famílias, empresas e outros grupos da sociedade tem efeitos sobre outros grupos (possivelmente após um intervalo de tempo) e esses efeitos podem persistir nas gerações futuras. Porém, os atores são muitos e os efeitos, tanto benéficos quanto prejudiciais, acumulam-se em estoques econômicos e físicos. Uma descrição detalhada pode ser encontrada no site da Cambridge Econometrics.²¹⁸

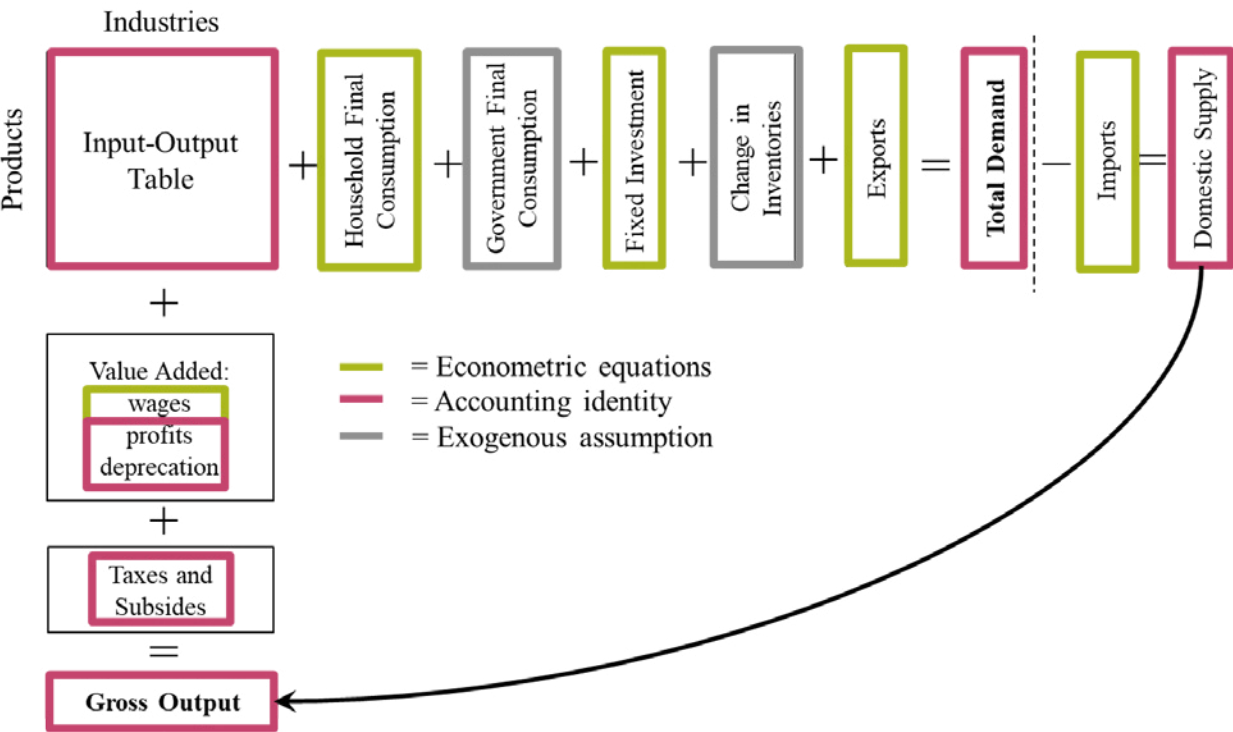
Os efeitos das transações econômicas dos agentes econômicos são transmitidos por meio do meio ambiente, da economia e do sistema monetário e de preços (através dos mercados de trabalho e commodities), bem como pelas redes globais de transporte e informação. Os mercados transmitem efeitos de três maneiras principais: 1) através do nível de atividade, criando demanda por insumos de materiais, combustíveis e mão de obra; 2) por meio de salários e preços que afetam a renda; e 3) por meio de rendas, levando, por sua vez, a maiores demandas por bens e serviços. Essas

interdependências sugerem que o modelo E3 deve ser abrangente e incluir muitos vínculos entre diferentes partes dos sistemas econômico e energético. Daí porque o E3ME foi desenhado com alta precisão geográfica e setorial.

O E3ME-FTT é um modelo global de 71 regiões, que representa as principais economias individualmente e distingue 70 setores econômicos em países europeus e 44 em países não europeus. Trata-se de um modelo macroeconômico orientado pela demanda, que determina os componentes da demanda usando econometria de séries temporais para resolver os componentes da demanda final e vários outros indicadores. Veja a Figura 71. Os parâmetros econométricos representam o comportamento passado e atual em resposta a choques.

O domínio da energia também é determinado por relações econométricas e se baseia em algumas das identidades contábeis apresentadas acima, mas também inclui respostas à inovação endógena e aos preços da energia. A parte dos preços das energias não renováveis no atacado é formada através de uma curva de oferta, que incorpora um parâmetro de incerteza. Depois os impostos são então adicionados.

Figure 71: National accounts structure of E3ME.



²¹⁸ Cambridge Econometrics (2022). E3ME Model Manual. Available at: <https://www.e3me.com/what/e3me/>

O papel da tecnologia no modelo E3ME-FTT

Compreender por que e como os agentes econômicos escolhem as tecnologias é importante nas questões que envolvem a descarbonização da economia. As equações econométricas de séries temporais requerem um longo histórico para simular o futuro. Para novas tecnologias, tal história não existe e, portanto, as equações econométricas não são totalmente adequadas para lidar com transições induzidas pela tecnologia. É aqui que entra o *Future Technology Transformations* (FTT). O FTT é um conjunto de modelos integrados ao E3ME que descreve a tomada de decisões tecnológicas nas indústrias com maior emissão e uso intensivo de energia, como geração de energia,²¹⁹ ferro e aço,²²⁰ aquecimento doméstico,²²¹ e veículos de passeio.²²² Baseia-se no entendimento, vindo da economia evolutiva, de que os regimes sociotécnicos (porque algo é feito da maneira que é feito) mudam devido a pressões internas (por exemplo, inovação) e externas (por exemplo, escassez ou políticas), e essa mudança é muitas vezes irreversível e não marginal. O FTT incorpora a incerteza em seus parâmetros de entrada, o que representa o caráter heterogêneo dos agentes econômicos, bem como a incerteza fundamental.

O FTT determina a configuração da tecnologia para atender a demanda, que é determinada em outra parte do E3ME-FTT. O núcleo baseia-se na função do replicador Lotka-Volterra, que compara todas as tecnologias em pares e considera as preferências do investidor (determinadas como um logit binário), frequências de substituição de tecnologia e participações de mercado do ano anterior como entradas para determinar as participações de mercado de o ano atual.²²³ Inclui feedbacks positivos, como aprender fazendo com base em incrementos cumulativos de capacidade tecnológica global, e feedbacks negativos devido a restrições setoriais, como a adoção de VRE no setor de energia, levando a incompatibilidades entre oferta e demanda ou disponibilidade de sucata sendo limitada para reciclagem no setor siderúrgico.

Como o E3ME difere de outros modelos?

O E3ME é frequentemente comparado aos modelos de Equilíbrio Geral Computável (*Computable General Equilibrium* - CGE) ou de Equilíbrio Geral Estocástico Discreto (*Discrete Stochastic General Equilibrium* - DSGE).^{224 225} Em muitos aspectos, essas abordagens são semelhantes, sendo empregadas para responder a perguntas semelhantes e usando entradas e saídas semelhantes. No entanto, subjacentes a isso estão importantes diferenças teóricas. Modelos como o E3ME se baseiam em dados e tentam inferir relações econômicas a partir deles. A maioria dos outros modelos macroeconômicos ou de avaliação integrada (IAMs) tenta se basear em teorias e fundamentos micro.

Em uma estrutura típica de modelos CGE e DSGE, assume-se um comportamento de otimização, a produção é determinada por restrições do lado da oferta e os preços se ajustam totalmente para que toda a capacidade disponível seja usada. No E3ME, a determinação da produção vem do lado da demanda da economia e é possível ter capacidade econômica ociosa. Não se assume que os preços sempre se ajustam aos níveis de equilíbrio do mercado.

As diferenças têm implicações práticas importantes porque significam que, no E3ME, a regulação e outras políticas podem potencialmente levar a aumentos na produção, se forem capazes de aproveitar a capacidade econômica disponível. O papel do setor financeiro é fundamenta

O papel das finanças

O E3ME é um modelo pós-keynesiano e dentro dessa escola de pensamento o dinheiro é endógeno – ou seja, pode ser criado por bancos através, por exemplo, de empréstimos. Essa abordagem difere daquela em muitos outros modelos em que a oferta de moeda é fixa.²²⁶ Uma oferta fixa de moeda implica o crowding out total, enquanto uma oferta endógena de moeda pode se não. Então, o modelo E3ME é agnóstico em finanças. Ele acompanha as necessidades de investimento de determinado setor em função das relações econométricas ou dos resultados do FTT, mas não informa se o financiamento demandado está acessível.

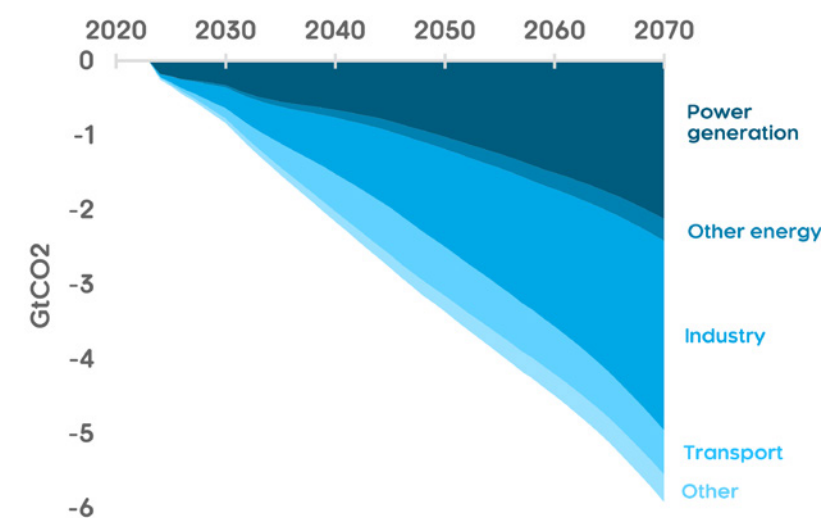
Resultados

Emissões de CO2

Comparando o cenário de zero líquido com o cenário de referência (em linha com as políticas atuais), foi encontrada uma redução de 5,9 Gt de emissões de CO2 oriundas do setor de energia e processos relacionados até 2070, totalizando uma redução acumulada de emissões de 141 Gt CO2 entre 2020 e 2070. Em termos percentuais, trata-se de uma redução de 91% em comparação com o cenário de referência, o que deixa um resíduo de 0,5 Gt CO2 de emissões anuais até 2070, a ser supostamente compensado por meio da mitigação das emissões do uso da terra (ver Figura 72). A maior parte das reduções é alcançada no setor de geração de energia e na indústria, com contribuições menores dos setores de transporte e residencial. Os dois primeiros setores dependem em grande parte de combustíveis fósseis no cenário de referência, que são

excluídos devido à mudança tecnológica como resultado do pacote de políticas. Embora o cenário do zero líquido apresente uma descarbonização quase completa do setor de transporte rodoviário até 2050, o cenário de referência também apresenta uma descarbonização mais parcial, particularmente a partir de 2045. As diferenças nos resultados de CO2 entre o cenário líquido zero e o referência são, portanto, um tanto limitadas no setor de transporte. O setor residencial está quase totalmente descarbonizado no cenário de zero líquido até 2070. Porém, os níveis de emissões domésticas também são baixos no cenário referência, já que a maioria das famílias muda de aquecimento baseado em biocombustível para alternativas de baixo carbono. No cenário zero líquido, parte do aquecimento baseado em gás liquefeito de petróleo (GLP) é substituído por tecnologias limpas, contribuindo com uma pequena redução nas emissões de CO2.

Figura 72: Emissões de CO2 do setor de energia e processos relacionados, diferenças absolutas em relação ao cenário de referência, 2020-2070, GtCO2



Demanda primária de energia

O pacote de políticas remove a maior parte da dependência de combustíveis fósseis e isso é ilustrado pelas mudanças na demanda primária de energia entre o cenário líquido zero e o cenário referência (ver Figura 73). A demanda primária total de energia cai 8,6 PWh em relação à referência até 2070 (uma redução de 24%), à medida que empresas e consumidores investem em medidas de eficiência energética e mudam para tecnologias mais eficientes em termos energéticos (como veículos elétricos). A produção de energia primária baseada em carvão e petróleo é substituída principalmente por energia solar, que é possibilitada pela eletrificação de muitas tecnologias de uso final. Isso inclui a eletrificação do setor de transporte rodoviário, com o uso de combustível em veículos

com motor de combustão interna quase desaparecendo até 2050. Fortes quedas no uso de petróleo também são observadas na geração de energia e nos setores industriais. O uso de carvão registra fortes declínios em uma série de indústrias pesadas, incluindo geração de energia, siderurgia e minerais não metálicos. O declínio na demanda de gás é impulsionado pela redução da utilização de GLP como fonte de energia nas residências, bem como pelo menor uso de gás natural em aplicações industriais. A energia solar torna-se uma tecnologia dominante em 2070, com uma participação de 57% na demanda de energia primária. Grande parte da demanda restante de combustível fóssil é para uso não energético ou para aplicações com tecnologia de captura de carbono incorporada.

²¹⁹ Mercure, J. F. (2012). FTT:Power: A Global Model of the Power Sector with Induced Technological Change and Natural Resource Depletion. *Energy Policy* 48: 799-811.

²²⁰ Vercoulen, P., et al. (2018). Decarbonizing the East Asian steel industry in 2050. Meijo University Discussion Paper #0008.

²²¹ Knobloch, F. et al. (2021). FTT: Heat – A Simulation Model for Technological Change in the European Residential Heating Sector. *Energy Policy* 153: 112249.

²²² Lam, A and Mercure, J-F. (2015). The Effectiveness of Policy on Consumer Choices for Private Road Passenger Transport Emissions Reductions in Six Major Economies. *Environmental Research Letters*, 10(6): 064008.

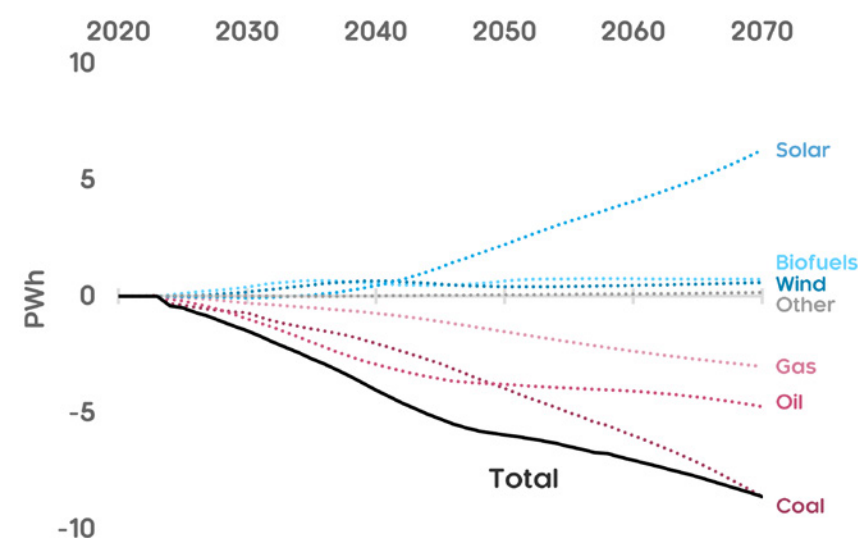
²²³ Mercure, J. F. (2015). An Age Structured Demographic Theory of Technological Change. *Journal of Evolutionary Economics*, 25(4): 787-820.

²²⁴ Mercure, J. F., et al. (2019). Modelling Innovation and The Macroeconomics of Low-Carbon Transitions: Theory, Perspectives and Practical Use. *Climate Policy*, 19(8): 1019-1037.

²²⁵ Lefevre, J., et al. (2022). Global Socio-Economic and Climate Change Mitigation Scenarios Through the Lens of Structural Change. *Global Environmental Change* 74: 102510.

²²⁶ Mercure, J-F and Pollitt, H. (2018). The Role of Money and the Financial Sector in Energy-Economy Models Used for Assessing Climate and Energy Policy. *Climate Policy*, 18(2): 184-197.

Figura 73: Demanda primária de energia por operadora, diferenças absolutas em relação ao cenário de referência, 2020-2070, PWh.

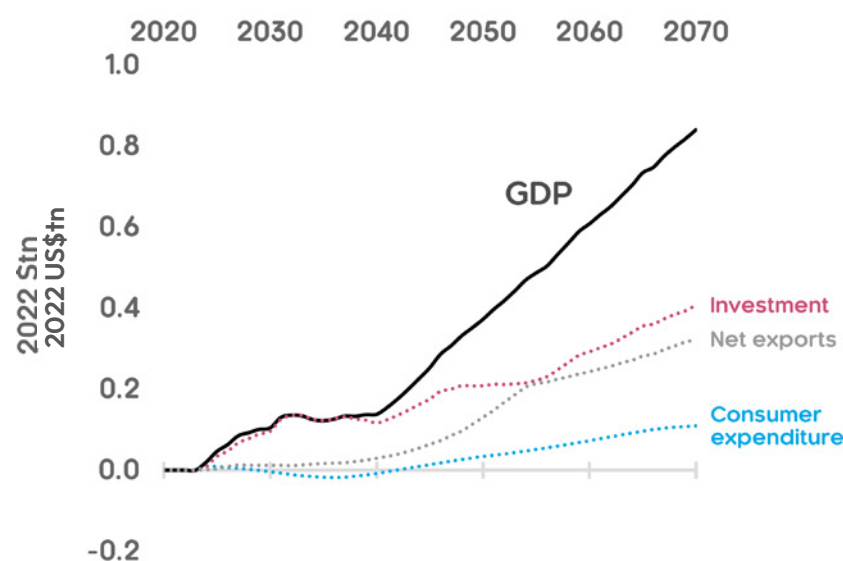


PIB e componentes

Nossa modelagem sugere que a transição para uma economia de zero líquido provavelmente leva a impactos macroeconômicos positivos na Índia. O PIB poderia crescer em US\$ 840 bilhões adicionais até 2070 em comparação com o cenário de referência (ver Figura 74). Isso representa um aumento de 2,5%. Grande parte dessa demanda adicional é impulsionada por investimentos em tecnologias de baixo carbono e medidas de eficiência energética, que criam atividade econômica em construção e engenharia elétrica e dominam entre 2024 e 2040. Posteriormente, há também um ganho substancial com a realocação da produção de energia. À

medida que vários usuários de energia mudam para tecnologias elétricas, a produção no setor doméstico de geração de energia aumenta substancialmente, levando a uma menor dependência de combustíveis fósseis importados, o que melhora a balança comercial. Um impacto menor pode ser visto a partir do efeito da transição sobre o gasto do consumidor. Os ganhos de emprego resultantes do aumento da produção em vários setores (ver abaixo) contribuem para um aumento da renda real e do consumo. Da mesma forma, as famílias aplicam tecnologias mais eficientes, o que reduz as contas de energia e libera gastos em outros bens e serviços.

Figura 74: PIB e componentes, diferenças absolutas em relação ao cenário de referência, 2020-2070, 2022 \$tn.

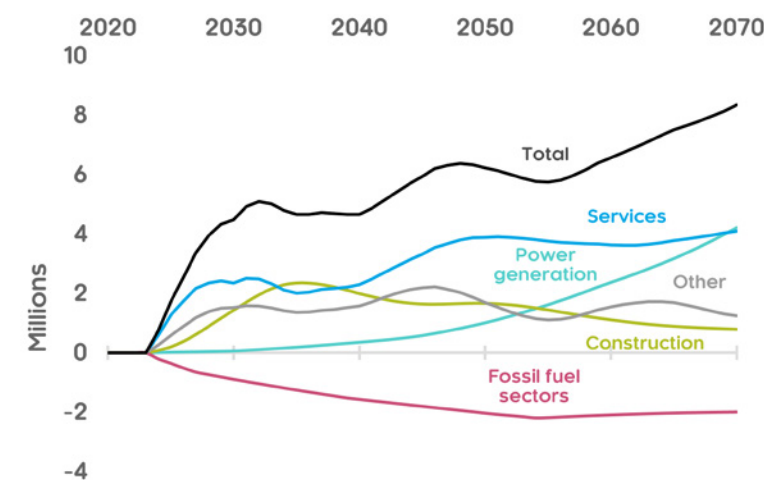


Emprego

Embora os resultados do PIB indiquem impactos sobretudo positivos, as simulações mostram que nem todos têm a ganhar. A transição para longe dos combustíveis fósseis – particularmente o carvão – provavelmente levará à perda de empregos nos setores relacionados a combustíveis fósseis, incluindo setores extrativos e de refino. Mais de 2 milhões de empregos estão em risco. Esses empregos podem estar em risco devido à automação, independentemente das políticas de mitigação, como pode ser o caso da China.²²⁷ No entanto, essas perdas são compensadas pela criação de empregos em outros setores. Grande parte desse emprego estaria concentrado no setor de geração de energia, uma vez que a produção de energia é

reposicionada na economia da Índia. Há também forte impulso ao emprego no setor de construção, particularmente na parte inicial e intermediária do período plotado do cenário, à medida que empregos na construção e reforma são necessários para realizar a transição em andamento. O aumento do emprego nesses setores incrementa a renda dos consumidores, e seu consumo adicional se concentra nos setores de serviços, que também veem a produção e o emprego aumentarem. No geral, os resultados da nossa modelagem sugerem que o emprego agregado da Índia teria um aumento de 8,4 milhões até 2070 como resultado da transição para energia limpa – um aumento de 1,6% em relação aos níveis de referência.

Figura 75: Emprego, diferenças absolutas em relação ao cenário de referência, 2022-2070, em milhões.



Discussão e conclusão

Em primeiro lugar, nenhum modelo sozinho conta uma história completa. Alguns aspectos importantes estão faltando nessas simulações. Primeiro, as habilidades não são rastreadas e, portanto, fica implícito que os trabalhos são intercambiáveis. Isso dificilmente será o caso, e seria necessário requalificar aqueles que perdem seus empregos em setores relacionados a combustíveis fósseis. Em segundo lugar, a oferta de dinheiro é endógena no modelo E3ME-FTT. No entanto, o modelo é agnóstico quanto à origem dos investimentos (por exemplo, empréstimos, investimento estrangeiro, poupança ou riqueza acumulada, etc). Aqui, assume-se que os investimentos para facilitar essa transição estão disponíveis. Portanto, os investimentos adicionais mostrados no cenário líquido zero devem ser interpretados como os investimentos necessários para alcançar a transição descrita acima. Em terceiro lugar, assume-se o aumento da captura de carbono ou a redução das emissões do uso da terra. No momento,

o modelo não inclui uma representação do uso da terra. Quarto, os danos causados pelo clima e pela poluição não são contabilizados em nenhum cenário. A provável redução dos danos climáticos e da poluição fornece outro benefício da descarbonização que é frequentemente negligenciado e – reconhecidamente – difícil de estimar.

Apesar dessas limitações, consideramos provável que muitas oportunidades estejam à frente para a Índia no caminho para o zero líquido até 2070. A transição oferece oportunidades de aumentar a segurança energética da Índia, tornar o sistema de fornecimento de energia mais eficiente em geral, gerar empregos em larga escala e – o mais importante – promover ampla uma redução das emissões. É importante notar que o resto do mundo também adota políticas de descarbonização, o que contribui para tornar as tecnologias de baixo carbono mais acessíveis devido a um impulso global.

²²⁷ Clark, A. and Zhang, W. (2022). Estimating the Employment and Fiscal Consequences of Thermal Coal Phase-Out in China. *Energies* 15(3): 800. <https://doi.org/10.3390/en15030800> (Resalte-se que esse trabalho consta no presente relatório como o estudo de caso A China e as Consequências Sociais da Transição do Carvão).

ESTUDO DE CASO:

Descarbonizando a economia indiana: políticas e impactos

DEEPTHI SWAMY (WRI ÍNDIA), VARUN AGARWAL (WRI ÍNDIA), ULKA KELKAR (WRI ÍNDIA)

Questões de política: Quais são as combinações de políticas mais impactantes para descarbonizar a economia indiana nas próximas três décadas? Quais são as prováveis implicações da adoção dessas políticas sobre o crescimento econômico e o emprego?

Região: Índia

Método: Modelo de dinâmica de sistemas

Principais conclusões: A descarbonização da economia indiana é possível concentrando uma série de políticas na descarbonização dos setores de energia, transporte e indústria, ao mesmo tempo em que gera economia líquida de custos e alcança resultados melhores em termos de crescimento econômico e emprego.

Engajamento: O cenário de descarbonização subjacente a este estudo de caso foi desenvolvido e refinado em consulta com especialistas setoriais da indústria, grupos de reflexão, academia, parceiros de financiamento e alguns membros da comunidade de formulação de políticas. As principais descobertas e percepções da análise foram apresentadas e discutidas em plataformas, incluindo a pesquisa colaborativa para uma proposta de Aliança Climática Global (Global Climate Alliance - GCA)²²⁸ e grupos de trabalho criados pelo Ministério Indiano de Transporte Rodoviário e Rodovias e pelo National Institute for Transforming India (NITI Aayog) no âmbito do Fórum de Modelagem de Clima e Energia da Índia (India Climate and Energy Modelling Forum - ICEMF).²²⁹

Resumo: Os autores usam um modelo de dinâmica de sistemas para investigar que combinações de políticas podem ser necessárias para descarbonizar a economia indiana e quais podem ser os impactos disso no crescimento e no emprego. O modelo permite uma representação mais realista da interação entre as políticas e a economia e os resultados indicam que a descarbonização da economia indiana é possível, gerando ao mesmo tempo economia líquida de custos e resultados melhores de crescimento econômico e emprego.

²²⁸ A Aliança Climática Global (GCA) é um esforço de pesquisa independente para avaliar como os países do Sul Global podem garantir melhor o apoio dos países do Norte Global para abordar os impactos econômicos das mudanças climáticas, incluindo medidas de adaptação e mitigação. Nos últimos dois anos, várias instituições acadêmicas e grupos de reflexão têm colaborado nessas questões e reunido seus esforços individuais de pesquisa.

²²⁹ O Fórum de Modelagem de Clima e Energia da Índia (ICEMF) é uma plataforma para os principais especialistas em energia, grupos de reflexão, pesquisadores, técnicos em modelagem e formuladores de políticas para colaborar e examinar questões importantes relacionadas ao clima, energia e meio ambiente, incluindo suas relações econômicas, por meio de exercícios de modelagem integrados.

Introdução

A Índia anunciou sua meta de emissões líquidas zero até 2070 na COP-26 em novembro de 2021.²³⁰ Definir uma trajetória de desenvolvimento de baixo carbono para o país que atenda às aspirações de seu povo, como acesso confiável a energia adequada, exigirá uma profunda transformação estrutural da economia indiana, que depende de combustíveis fósseis para cerca de três quartos de suas necessidades totais de energia no momento.²³¹

Para desenhar pacotes de políticas eficazes que atendam aos objetivos de descarbonização e desenvolvimento da Índia, não é suficiente fazer uma avaliação das diferentes opções de políticas separadamente; também é preciso que os formuladores de políticas compreendam as possíveis relações entre as opções de política em diferentes setores e a economia e como essas interações afetam a consecução dos objetivos de política.

Quadro analítico

O Simulador de Política Energética da Índia (*Energy Policy Simulator* - EPS)²³² é um modelo de dinâmica de sistemas de código aberto que pode contribuir para informar a formulação de políticas, permitindo uma avaliação integrada de pacotes de políticas climáticas intersetoriais para a Índia até 2050, juntamente com suas implicações macroeconômicas.

As opções políticas no EPS abrangem os principais setores da economia: transporte, construção, fornecimento de eletricidade, indústria (incluindo agricultura, resíduos e águas residuais), uso da terra e hidrogênio. As opções de políticas incluídas abrangem tanto as políticas de preços (por exemplo, impostos e subsídios) quanto as cotas tecnológicas (por exemplo, para adoção ou abandono de determinada tecnologia). A estrutura do modelo, sua abordagem, as fontes de dados e os pressupostos do modelo India EPS são explicados em uma nota técnica disponível *online*.²³³

Os principais pontos fortes da abordagem EPS, em comparação com os modelos usados para análise de políticas climáticas na Índia até agora, incluem o seguinte:

- A abordagem de dinâmica de sistemas do EPS pode oferecer uma representação mais realista da interação dinâmica entre as políticas e a economia em comparação com as abordagens de modelagem existentes (a maioria usa um equilíbrio geral computacional ou uma abordagem de equilíbrio parcial), dando origem a efeitos gerais que são diferentes da soma dos efeitos da adoção de políticas individuais. Por exemplo, o EPS calcula os custos de tecnologia com base em uma combinação de

preços globais projetados e aprendizagem endógena para contabilizar os efeitos da difusão de tecnologia local. Isso significa que uma cota tecnológica ou um subsídio para promover a aceitação de uma tecnologia podem criar um ciclo de reforço, pelo qual o aumento da aceitação de uma tecnologia devido a uma política reduz ainda mais os preços da tecnologia, o que, por sua vez, acelera sua adoção.

- A análise de políticas intersetoriais possibilitada pela cobertura do EPS em toda a economia pode permitir que os usuários encontrem sinergias e compensações na implementação de políticas em diferentes setores. Por exemplo, as políticas de descarbonização do fornecimento de eletricidade que não acompanham o ritmo das políticas de eletrificação de uso final impedem que estas atinjam seu potencial de mitigação e, em casos extremos, podem resultar em uma penalidade de emissões.
- O EPS inclui um modelo integrado de insumo-produto, que calcula o impacto das políticas climáticas implementadas em um cenário sobre parâmetros macroeconômicos, como PIB, emprego e contas nacionais, considerando os efeitos econômicos diretos, indiretos e induzidos das políticas implementadas. Esses resultados normalmente não estão disponíveis em modelos atualmente usados para análise de políticas climáticas na Índia, e a literatura sobre os potenciais implicações macroeconômicas da ação climática na Índia é limitada. No entanto, este é um componente de análise particularmente relevante para os formuladores de políticas indianos, para quem o desenvolvimento econômico é um objetivo político fundamental.

Algumas das principais limitações do EPS são as seguintes:

- Ele simula políticas em uma escala espacial (nacional) e temporal (anual) agregada. Os resultados do modelo estão disponíveis em um nível agregado e não permitem a avaliação de como os efeitos das políticas adotadas – por exemplo, impactos sobre empregos e PIB – são distribuídos entre regiões ou grupos populacionais, como por renda, sexo ou idade.
- Os impactos econômicos indiretos e induzidos no modelo são calculados com base nas relações de transação entre as indústrias na economia de acordo com as tabelas de entrada e saída (insumo-produto) da Índia a partir de 2015, que se supõe que se mantenham ao longo do tempo.
- Atualmente não é possível quantificar a incerteza no modelo.

²³⁰ <https://pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=1768712>

²³¹ <https://www.iea.org/reports/india-energy-outlook-2021/energy-in-india-today>

²³² <https://india.energypolicy.solutions/scenarios/home>

²³³ <https://www.wri.org/research/tool-designing-policy-packages-indias-climate-targets>

Nossa análise

Usamos o EPS da Índia para analisar um pacote de políticas com foco nos setores de energia, indústria e transporte que colocaria a Índia no caminho de atingir emissões líquidas zero de CO2 até 2070. Nosso pacote de políticas, doravante denominado cenário de descarbonização de longo prazo (*long-term decarbonisation* - LTD), baseia-se nas metas políticas existentes para energia renovável, eficiência energética e mobilidade elétrica no curto prazo e considera a introdução progressiva, apoiada por políticas, de tecnologias atualmente nascentes como hidrogênio e armazenamento em bateria, visando atingir níveis ambiciosos de implementação até 2050. A escolha das políticas modeladas neste cenário é guiada por três critérios principais: a) seu alinhamento com as políticas e metas atuais na Índia e o diálogo emergente em torno de políticas para apoiar novas tecnologias verdes como o hidrogênio, b) a eficácia relativa de uma política (quando comparada a outras opções de política disponíveis no modelo) em contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, e c) seu impacto sobre indicadores macroeconômicos – ou seja, contas nacionais, PIB e emprego.

Nossos resultados são apresentados em relação a um cenário de referência, que incorpora o impacto das políticas existentes, a partir de 2019.

O nível de ambição para as configurações de política e a taxa de implementação de políticas no cenário LTD é decidido com base em uma combinação de fatores, incluindo o nível dos resultados no cenário de referência, a revisão da literatura para identificar o potencial técnico alcançável para as tecnologias modeladas junto com as políticas, e consultas preliminares a especialistas setoriais sobre a viabilidade das políticas, considerando os desafios de implementação na Índia.

Nossa abordagem é construir um cenário prospectivo, ou “e se”, destinado a avaliar os resultados plausíveis de um determinado conjunto de políticas, em vez de fornecer um conjunto de ações políticas consideradas “ótimas”. Existem várias combinações alternativas de políticas que podem atingir o mesmo nível de emissões no futuro, cada uma com suas próprias implicações para outros resultados, como custos, benefícios sociais e impactos econômicos.

As questões específicas de interesse político para nossa análise foram as seguintes:

- Quais são as políticas/combinações de políticas mais impactantes para descarbonizar a economia indiana nas próximas três décadas?

- Quais são as prováveis implicações da adoção dessas políticas sobre o investimento, o crescimento econômico e o emprego?

Resultados

O cenário de referência vê as emissões totais da Índia aproximadamente dobrando nas próximas três décadas – as emissões aumentam de pouco mais de 3 bilhões de toneladas de equivalente de dióxido de carbono (BtCO2e) em 2022 para cerca de 6 BtCO2e em 2050. As emissões aumentam apesar de uma melhoria de 61% nas emissões por unidade do PIB durante esse período, impulsionado pelo crescimento econômico e pela urbanização.

O crescimento mais rápido das emissões ocorre nos setores industrial e de transporte – em ambos as emissões aproximadamente triplicarão até 2050 em comparação com o presente. As emissões do setor de energia, por outro lado, não aumentam significativamente em relação aos níveis atuais, devido às metas de energia renovável da Índia e à queda nos custos de tecnologia, que são considerados no cenário de referência. Em 2050, o setor industrial responde por quase 50% do total de emissões, seguido por energia (18%) e transporte (16%).

Principais alavancas políticas para a descarbonização

As políticas no cenário LTD estão focadas principalmente na descarbonização de três setores – a saber, indústria e transporte, devido ao rápido crescimento das emissões no cenário de referência, e energia, porque a eletricidade verde é um pré-requisito para o sucesso de usar políticas de eletrificação e produção de hidrogênio verde.

As políticas (e seu nível de ambição) são escolhidas aplicando os critérios mencionados na seção anterior. Por exemplo, as cotas tecnológicas para a geração de eletricidade limpa e adoção de veículos elétricos baseiam-se nas metas políticas existentes para energia renovável e mobilidade elétrica. Cotas de eletrificação e adoção de hidrogênio na indústria são escolhidas devido ao alto potencial de redução de emissões de tecnologias subjacentes, com base em consultas preliminares com especialistas setoriais. A taxação do carbono é escolhida principalmente como meio de aumentar a receita pública durante a transição, embora também desempenhe um papel complementar no apoio às regras tecnológicas compulsórias de descarbonização. Os principais pressupostos de política do cenário LTD estão resumidos na Tabela 12.

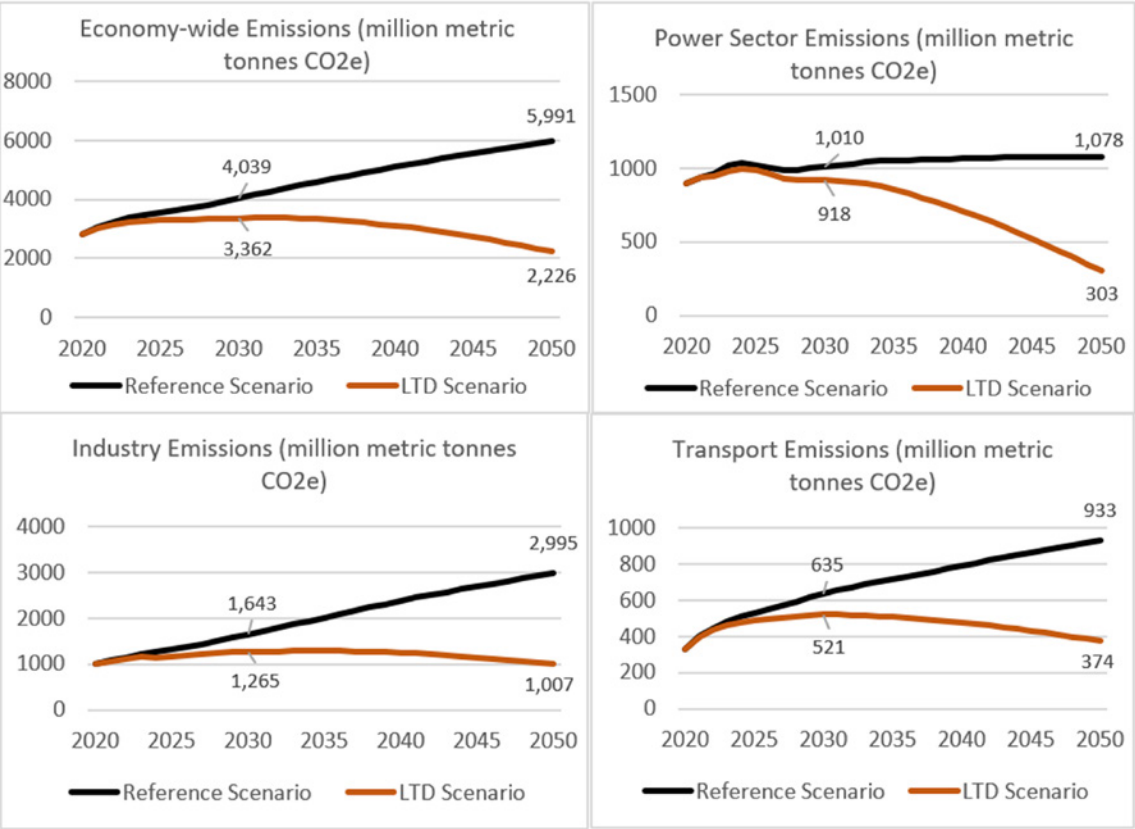
Tabela 12: Principais alavancas de política no Cenário LTD. *Salvo indicação em contrário, a política é implementada linearmente a partir de 2020 para atingir a definição de política completa em 2050.

Política	Cenário de referência (2050)	Cenário LTD (2050)*
Eletrificação industrial e cota de hidrogênio (% Substituição de combustíveis fósseis no setor industrial. Aumentando linearmente de 0 em 2030)	0	50%
Produção de hidrogênio via cotas de eletrólise (Aumentando linearmente de 0 em 2025)	0	100%
Taxação de carbono (por tonelada de CO2e) (Nos setores de energia e indústria)	0	INR 3500 (USD 50)
Cota para vendas de EVs/hidrogênio (% das vendas de veículos novos) Passageiro LDV, Passageiro HDV Frete LDV, Frete HDV 2W, 3W (Cotas de vendas de H2V a partir de 2030)	35%, 23% 14%, 4% 38%, 30%	80%, 50% (+25% H2V) 70%, 25% (+45% H2V) 100%, 100%
Cota para eficiência material (Redução da demanda por bens intensivos em emissões no Cenário de Referência)	-	Cement: 15% Iron & steel: 20%
Cota de geração de eletricidade livre de carbono (mínimo obrigatório %)	68%	93% (75%)
Cota de aposentadoria antecipada para energia a carvão (aumentando linearmente de 300MW/ano em 2027)	-	7 GW/year

As políticas no cenário LTD reduzem as emissões do cenário de referência em cerca de um quinto em 2030 e dois terços em 2050. Em termos cumulativos, as emissões reduziram no período 2020-2050 em

relação ao cenário de referência para pouco mais de 46 BtCO₂e. A Figura 76 mostra as trajetórias de emissões setoriais e em toda a economia para os dois cenários durante esse período.

Figura 76: Comparação das emissões de gases de efeito estufa nos cenários referência e LTD.



No setor de energia, a proporção de geração de eletricidade livre de carbono chega perto de 50% até 2030 e mais de 90% até 2050 (em comparação com pouco menos de 25% atualmente) por causa de cotas para geração de eletricidade livre de carbono e aposentadoria precoce da energia a carvão. A redução no custo de energia renovável (ER) devido à difusão de tecnologia, inicialmente como resultado dessas cotas, por sua vez, impulsiona a adição de capacidade de ER, o que reduz ainda mais os custos. Assim, um efeito de reforço positivo é criado para a adoção da tecnologia de ER, e a geração de eletricidade livre de carbono excede o requisito obrigatório da política ao longo do tempo. Isso é complementado por um imposto sobre o carbono, que simultaneamente torna a eletricidade baseada em combustível fóssil mais cara. Juntamente com a crescente competitividade de custo de ER em relação aos combustíveis fósseis, as políticas do setor de energia juntas não resultam em novas adições de capacidade de carvão após 2024.

A rápida descarbonização do setor de energia apoia as cotas de substituição de combustíveis fósseis por eletricidade e/ou hidrogênio verde na indústria e nos setores de transporte para alcançar seu potencial de mitigação de emissões. Essas cotas para a troca de combustível, implementadas gradualmente a partir de 2025 ou 2030, servem como as principais alavancas políticas para a descarbonização da indústria e dos setores de transporte no longo prazo, enquanto as políticas de eficiência energética desempenham um papel importante no curto prazo. As cotas são complementadas pelo imposto sobre o carbono, como no setor de energia. No entanto, ao contrário do setor de energia, essa combinação de políticas não atinge um ponto de inflexão de custo nos setores de indústria e transporte devido a uma implementação mais gradual das cotas e a uma maior diferença nos custos da tecnologia marrom e verde nesses setores. No entanto, participações significativamente mais altas de eletricidade e hidrogênio são alcançadas no mix geral de energia industrial e de transporte como resultado dessas políticas, em comparação com o cenário de referência (ver Tabela 13).

Tabela 13: Participação da eletricidade e do hidrogênio no mix de fontes de energia para os setores industrial e de transporte ao longo do tempo.

Ano	Mix de Fontes de Energia - Setor Industrial				Mix de Fontes de Energia - Setor de Transporte			
	Participação da Eletricidade		Participação de Hidrogênio		Participação da Eletricidade		Participação de Hidrogênio	
	Cenário de referência	Cenário LTD	Cenário de referência	Cenário LTD	Cenário de referência	Cenário LTD	Cenário de referência	Cenário LTD
Presente	13%		0%		1.5%		0%	
2030	16%	20%	0%	2%	3%	6%	0%	0%
2050	16%	40%	0%	18%	9%	29%	0%	7%

Resultados econômicos

Achamos que a descarbonização a longo prazo da economia indiana é possível: gera ganhos líquidos de custos em toda a economia ao longo do tempo e, ao mesmo tempo, alcança resultados melhores de crescimento econômico e emprego, em relação ao cenário de referência.

A transição para tecnologias verdes requer gastos de capital adicionais em relação ao cenário de referência. As despesas de capital anuais adicionais chegam a cerca de US\$ 28 bilhões (2018) (~0,5% do PIB) em 2030 e aumentam constantemente a partir de então, à medida que a infraestrutura de ERs, EVs, armazenamento de bateria e produção de hidrogênio verde aumenta, atingindo US\$ 247 bilhões (~1,5% do PIB) em 2050. Embora a escala dos investimentos iniciais de capital possa apresentar desafios em termos de financiamento, vemos que a redução nos custos de combustível, operações e manutenção em toda a economia devido à adoção de tecnologias verdes supera o investimento inicial custos de capital ao longo do tempo, criando economias líquidas no longo prazo a partir da década de 2040.

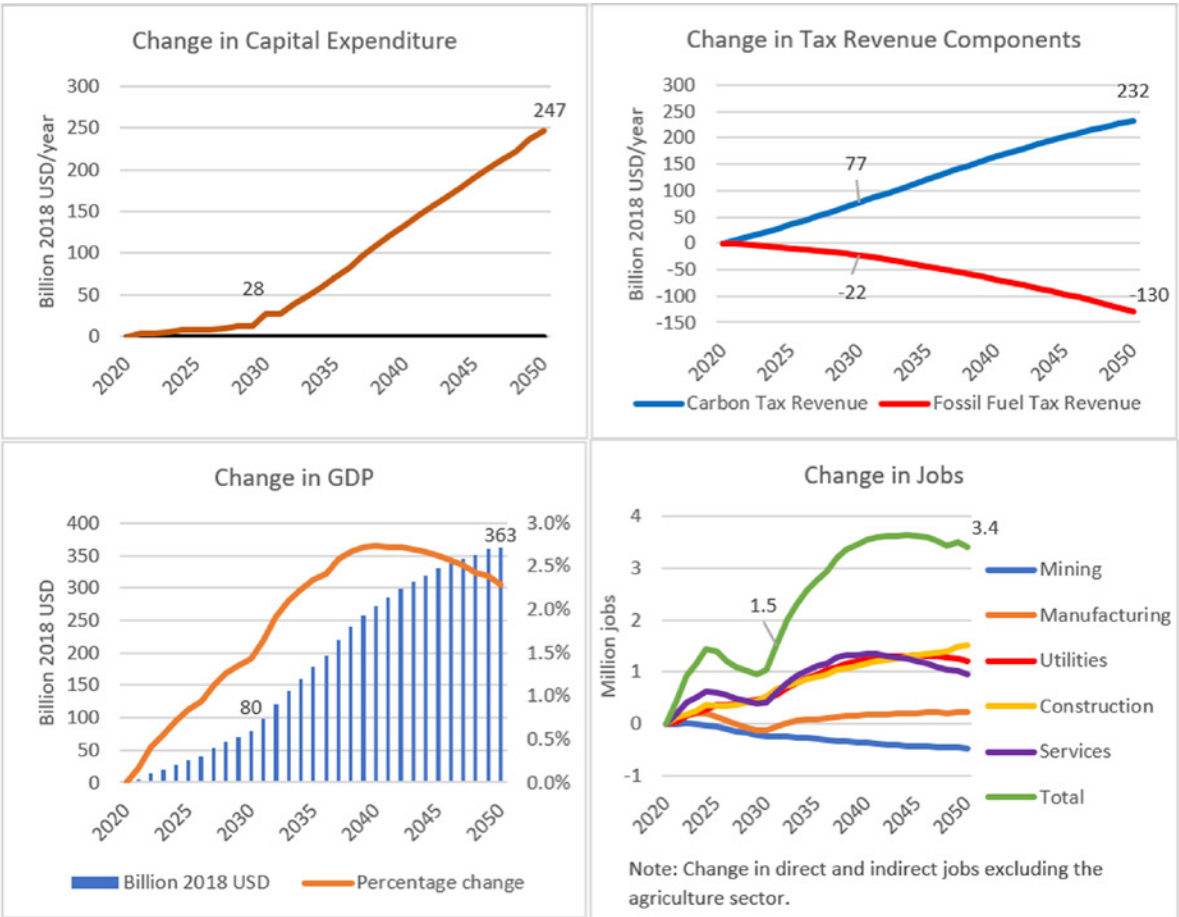
A transição para longe dos combustíveis fósseis resulta em uma contração de setores marrons, como mineração de carvão, refino de petróleo e fabricação de veículos com motor de combustão interna. Além disso, a redução no uso de produtos petrolíferos, que contribuem com mais de 25% da receita tributária

total do governo central atualmente, pode reduzir significativamente a arrecadação geral de impostos e agravar a contração econômica ao restringir os gastos do governo. Os gastos do governo em serviços básicos, como educação e saúde, têm um efeito multiplicador no crescimento econômico ao melhorar a produtividade. No entanto, descobrimos que um imposto sobre o carbono (aumentado gradualmente ao longo do tempo) tem o potencial de compensar a perda de impostos sobre o petróleo durante a transição, ampliando a base tributária para todos os usos de combustíveis fósseis que causam emissões, incluindo emissões de processos industriais.

O gasto público produtivo sustentado pelas receitas do imposto sobre o carbono, juntamente com o crescimento em setores como geração limpa de eletricidade e produção de hidrogênio, mais do que compensa a contração nos setores marrons no cenário LTD. No geral, o pacote de políticas no cenário LTD oferece um PIB 2,3% maior e gera 3,4 milhões de empregos a mais até 2050, em relação ao cenário de referência.²³⁴ Os drivers do crescimento econômico e do emprego são efeitos do lado da oferta – enquanto a demanda geral por energia e materiais diminui como resultado de melhorias de eficiência, os investimentos para descarbonizar a oferta (juntamente com os efeitos indiretos e induzidos associados) impulsionam o crescimento.²³⁵ A Figura 76 mostra os resultados macroeconômicos do cenário LTD em relação ao cenário de referência.

²³⁴ Estes incluem empregos diretos (criados devido a políticas climáticas promulgadas) e empregos indiretos (criados em indústrias que fornecem para indústrias diretamente afetadas). O setor agrícola está excluído das estimativas de empregos aqui apresentadas.
²³⁵ Os efeitos indiretos referem-se a mudanças na produção ou no emprego dos setores que abastecem o setor diretamente afetado por uma política. Os efeitos induzidos são criados por mudanças na reinjeção de dinheiro pelos trabalhadores ou pelo governo na economia como resultado de efeitos diretos e indiretos.

Figura 76: Resultados macroeconômicos no cenário LTD, em relação ao cenário de referência.



Conclusão

Nosso pacote de políticas no cenário LTD baseia-se principalmente em sinais de políticas em fases iniciais (por exemplo, cotas para energia renovável, mobilidade elétrica e combustíveis industriais) para estimular o investimento privado em tecnologias verdes e, por sua vez, o efeito reforçador da queda nos custos das tecnologias verdes decorrente de sua adoção, de maneira a acelerar ainda mais a adoção dessas tecnologias. A taxaço do carbono serve como política complementar neste contexto, reduzindo ainda mais o custo do uso das tecnologias verdes em relação às marrons. Em nosso pacote de políticas, o imposto sobre o carbono também serve para compensar a perda de receita pública decorrente da queda na arrecadação de impostos sobre o petróleo, mitigando assim o impacto negativo na atividade econômica devido a um corte nos gastos produtivos do governo. No entanto, uma política de precificação do carbono pode ter efeito significativo sobre os preços de *commodities* essenciais no curto prazo e ser ineficaz como ferramenta para aumentar a receita pública no longo prazo, pois o uso de combustíveis fósseis é eliminado da economia. Isso ressalta a necessidade de um projeto cuidadoso, incluindo uma avaliação de fontes alternativas de receita pública.

Existem vários tipos de políticas que não exploramos ou não conseguimos explorar em nosso pacote, os quais podem ser críticos para os formuladores de políticas avaliarem e considerarem à medida que a Índia avança em direção a um futuro de baixo carbono. Embora não tenhamos incluído subsídios em nosso pacote devido à sua implicação para as contas do governo, subsídios para tecnologias específicas podem servir como uma política complementar importante para acelerar a adoção de tecnologias verdes emergentes, tais como energia eólica offshore, hidrogênio e armazenamento por baterias, por criarem pontos de inflexão relativos aos custos dessas tecnologias, em combinação com outras políticas. Uma política complementar semelhante, mas que está fora do alcance do nosso pacote, é a criação de infraestrutura pública, como estações de recarga de veículos elétricos e redes de distribuição de hidrogênio, para incentivar a adoção de tecnologias verdes pelos consumidores e pela indústria.

Finalmente, para garantir que a transição de baixo carbono também seja sustentável e justa, políticas redistributivas devem ser avaliadas e incluídas em qualquer pacote de políticas para garantir que os custos e os benefícios da transição sejam distribuídos equitativamente por todos os setores da sociedade.



ESTUDO DE CASO:

Mapeamento de sistemas orientados a dados de ODS e interações de transição energética

FERNANDA SENRA DE MOURA (UNIVERSIDADE DE OXFORD) E PETE BARBROOK-JOHNSON (UNIVERSIDADE DE OXFORD)

Questão de política: Que riscos e oportunidades para os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) a transição energética deve criar e como podemos gerenciá-los?

Região: Brasil

Método: Uma abordagem baseada em dados para o mapeamento de sistemas.

Principais resultados: A energia eólica está relativamente bem conectada aos ODS e indicadores econômicos do Brasil, interagindo com resultados nos setores de saúde, água e saneamento, além de ter conexões mais intuitivas com emissões e acesso à eletricidade. Há também evidências de uma conexão pouco explorada entre energia eólica e biocombustíveis. Por outro lado, a produção de energia solar tem uma conexão mais distante com os ODS e os indicadores econômicos, sugerindo que há menos evidências de fortes sinergias ou trade-offs entre a energia solar e outros objetivos. Trabalhos futuros devem examinar mais de perto essas relações.

Engajamento: Este trabalho foi apresentado à comunidade brasileira de parceiros do Projeto EEIST, mas o engajamento mais amplo ainda não começou. O trabalho de modelagem está em andamento e o de engajamento está planejado para o próximo estágio de desenvolvimento. Isso envolverá a apresentação de mapas e análises completos para os *stakeholders* políticos, com foco em compensações e sinergias entre a transição e os ODS, de forma a alimentar uma discussão sobre como desenvolver e usar uma análise mais personalizada.

Resumo: Os autores adotam um modelo de dados para investigar as implicações mais gerais para o desenvolvimento decorrentes do aumento do papel das energias renováveis no setor de energia do Brasil. O principal objetivo do estudo é explorar sinergias e compensações entre a diversificação de energia renovável e outras dimensões do desenvolvimento sustentável, para que os formuladores de políticas possam decidir como alavancar sinergias e enfrentar gargalos para alcançar os ODS do país. O estudo usa uma abordagem de mapeamento de sistemas baseada em dados que combina métodos de estimativa de rede baseados em dados, análise de rede padrão e análise de mapas conceituais, permitindo representações quantitativas e qualitativas dos sistemas mais amplos nos quais as políticas de energia renovável estão inseridas, que por sua vez podem informar tomada de decisões de alto nível e coordenação de políticas intersetoriais.

Introdução

Que riscos e oportunidades para os ODS a transição energética deve criar e como podemos gerenciá-los? Neste estudo de caso, damos um passo atrás nos modelos de simulação de foco restrito e consideramos como a transição energética interage com um conjunto mais amplo de objetivos, representados pelos ODS. Usamos uma abordagem de mapeamento de sistemas baseada em dados para explorar as interações entre indicadores de ODS, economia e transição energética no Brasil. Especificamente, usamos dados de séries temporais em nível de país para estimar redes de ODS, indicadores econômicos e de transição energética (nossos mapas) e, em seguida, analisamos os mapas resultantes usando análise subjetiva de mapa conceituais para complementar as métricas de rede padrão.

Focamos nas interações entre os ODS e a expansão da energia eólica; e motivados por um conjunto inicial de resultados que sugerem uma ligação entre energia eólica e biocombustíveis, repetimos o exercício para estudar mais os biocombustíveis, com foco na cana de açúcar. No entanto, a análise usando esses tipos de mapas é flexível, de forma que se mostra também possível uma análise de políticas mais focada, ou a contextualização de outros resultados de modelagem, conforme demonstrado no subprojeto em curso no âmbito do Projeto EEIST no qual se baseia este estudo de caso.²³⁶

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: uma abordagem sistêmica para a política

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, com 17 ODS, foi adotada pela Assembleia Geral das Nações Unidas em 2015. Para cada objetivo, existem entre cinco e 19 metas e entre seis e 28 indicadores. A Agenda 2030 previu a integração dos objetivos de desenvolvimento econômico, social e ambiental como componentes de um sistema interligado, em vez de metas individuais. O trabalho acadêmico aplicado refletiu essa abordagem de sistemas para políticas, e há uma literatura emergente sobre as interações dos ODS,²³⁷ com muitas abordagens conceituando as interações como redes de indicadores dos ODS, como

fazemos aqui. Além disso, com o prazo de 2030 se aproximando e muitos países ficando para trás em várias metas, entender melhor as interações dos ODS tornou-se uma questão política fundamental, pois as sinergias precisam ser alavancadas e os *trade-offs* resolvidos.

Já se investigaram as interações entre a transição energética e os ODS. Nerini et al (2017)²³⁸ resumem as sinergias e compensações entre o ODS 7 (energia) e ODS não energéticos com base em indicações de especialistas. Da mesma forma, McCollum et al (2018)²³⁹ mapeiam sinergias e compensações entre energia e outros ODS, mas com base em uma revisão sistemática em grande escala da literatura sobre energia. O relatório mais recente do Grupo de Trabalho III do IPCC resume uma avaliação da literatura sobre a interação entre os ODS e as opções de mitigação das mudanças climáticas, incluindo a transição energética.²⁴⁰

Transição energética e os ODS no Brasil

No Brasil, a participação das fontes renováveis na matriz energética é historicamente alta (entre 39% e 58% desde 1970) e significativamente superior à média mundial (46% contra 14% em 2019).¹ No entanto, considerando os custos ambientais e a exposição climática associados à expansão da energia hidrelétrica de seus níveis atuais, as energias eólica e solar ganharam relevância nos últimos 10 anos como meio de diversificar a produção de energia renovável.

Nesse contexto, atualmente a energia limpa e acessível (ODS 7) é o único ODS alcançado e mantido no Brasil. Outros ainda no caminho para a conquista, mas com desafios remanescentes, são ação climática, água limpa e saneamento e educação de qualidade.²⁴² Em todas as outras dimensões, o desempenho é menos promissor. Portanto, entender melhor como a vantagem do Brasil em energia limpa e a recente diversificação de fontes renováveis na matriz energética interagem com outras dimensões do desenvolvimento sustentável pode fundamentar a elaboração de políticas-chave visando o cumprimento dos ODS.

²³⁶ Barbrook-Johnson, P. and Senra de Moura, F. (2022) Using Data-Driven Systems Mapping to Contextualise Complexity Economics Insights. INET Oxford working paper, <https://www.inet.ox.ac.uk/publications>.

²³⁷ Breuer, A. et al. (2019). Translating Sustainable Development Goal (SDG) Interdependencies into Policy Advice. Sustainability 11(7); Bennich, T. et al. (2020). Deciphering the Scientific Literature on SDG Interactions: A Review and Reading Guide. Science of The Total Environment 728, 138405.

²³⁸ Fuso Nerini, F. et al. (2018). Mapping Synergies and Trade-Offs Between Energy and the Sustainable Development Goals. Nature Energy 3, 10-15.

²³⁹ McCollum, D. et al. (2018). Connecting the Sustainable Development Goals by their Energy Inter-linkages. Environmental Research Letters 13, 033006. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaafe3>.

²⁴⁰ Shukla, P. et al., eds (2022). Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Summary for Policymakers, IPCC.

²⁴¹ Empresa de Pesquisa Energética. (2022). Balanço Energético Brasileiro 2022: Ano 2021. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro; Empresa de Pesquisa Energética (Brasil) (2022) Matriz energética e matriz elétrica. Blog ABCDEnergia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/abcdeenergia/Paginas/MATRIZ-ENERGETICA.aspx>.

²⁴² Sachs, J. et al. (2022). Sustainable Development Report 2022, Cambridge University Press, Cambridge.

Abordagem de mapeamento de sistemas orientados a dados

Trazendo dados para o mapeamento de sistemas

Usamos uma nova abordagem de mapeamento de sistemas baseada em dados, desenhada de forma a explorar amplas interações em diferentes domínios de um sistema e a contextualizar, comunicar e incorporar os insights do novo pensamento econômico em questões políticas do mundo real. Em um exercício típico de mapeamento de sistemas, o objetivo principal é determinar, muitas vezes de forma participativa, os fatores-chave do sistema e as ligações entre eles.²⁴³ Os principais resultados são um processo de mapeamento e um mapa correspondente representando uma visão abrangente e compartilhada das forças em ação, que por sua vez pode ser usado como uma ferramenta de enquadramento e discussão na formulação, apreciação e avaliação de políticas.

Nossa principal contribuição metodológica é fornecer uma abordagem para trazer dados para o processo de mapeamento e construir mapas de sistemas diretamente a partir dos dados. Essa abordagem nos permite construir redes que representam regularidades empíricas entre uma ampla gama de fatores e analisar essas redes de maneiras relevantes para as políticas.

Estimando a rede: métodos

Demonstramos o uso de duas técnicas de estimativa de rede baseadas em dados – redes de correlação e o algoritmo PC. Esses são apenas dois de uma longa lista de métodos que esperamos combinar no trabalho em andamento.

O limiar de correlação é uma das técnicas de estimativa de rede mais comuns, em grande parte porque é fácil de implementar e interpretar e não impõe suposições restritivas sobre as relações entre as variáveis. O método consiste em duas etapas principais: primeiro, dado um conjunto de nós (ou seja, as variáveis trazidas para a análise), estimamos uma matriz de correlação completa. Então, começando com uma rede vazia, para cada par de nós, populamos nossa rede com uma aresta (ou seja, uma conexão entre eles) se a correlação estimada entre eles for maior do que o limite escolhido e/ou se a probabilidade das estatísticas de teste observadas, caso não haja ligação real entre as variáveis (p-valor), é menor que o limite escolhido.

O limiar de correlação é uma boa referência; porém, como se concentra apenas em relacionamentos pareados, não pode abordar problemas causados por fatores de confusão (*confounders*) ou, de forma mais geral, mapear relacionamentos entre nós do sistema enquanto considera os outros nós do sistema (dependência condicional). Uma alternativa é pensar no sistema como uma rede de dependências condicionais que pode ser modelada como um grafo e usar testes de independência condicional para aprender a estrutura do grafo. Em outras palavras, ao avaliar se existe uma aresta entre dois nós, todas as variáveis do sistema são levadas em consideração.

Para implementar tal abordagem, aqui usamos o algoritmo PC,²⁴⁴ um dos principais algoritmos para aprendizado de estrutura causal. Isso funciona em três etapas: 1) determina o “esqueleto” da rede, ou seja, estima todas as arestas da rede, sem considerar a direção dos relacionamentos; 2) determina a orientação das arestas para v-estruturas $x \rightarrow z \leftarrow y$, ou seja, uma estrutura onde duas variáveis x e y têm um efeito comum z ; e 3) com base nos resultados das etapas 1 e 2, determina outras orientações das arestas.²⁴⁵

Estimando a rede: dados

Usamos séries temporais de ODS em nível de país, indicadores macroeconômicos e do setor de energia. Os dados sobre os indicadores dos ODS foram obtidos do banco de dados de ODS das Nações Unidas, complementados aqui com dados do Banco Mundial, Climate Watch Data, Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), Banco Mundial de Desigualdade e Sistema Integrado Brasileiro de Informações sobre Desastres (S2ID). Dados sobre o setor de energia, incluindo indicadores de transição energética, e sobre fatores macroeconômicos são do Ministério de Minas e Energia do Brasil, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Banco Mundial, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Observatório Brasileiro da Cana de Açúcar.

Usando e analisando mapas de sistemas

Uma vez que a rede foi estimada, diferentes abordagens podem ser usadas para analisar o sistema e interpretar os resultados. Recomendamos seguir Barbrook-Johnson e Penn (2021, 2022)²⁴⁶ e considerar três tipos amplos de uso e análise: (i) observar a estrutura dos mapas completos, ou seja, usar diferentes layouts e visualizações para explorar a estrutura geral

do mapa, procurando por clusters, gargalos e fatores desconectados, por exemplo; (ii) análise de rede, ou seja, usando medidas de rede formais para procurar fatores bem conectados e influentes; e (iii) análise de submapa, ou seja, olhar para subseções sob medida do mapa para considerar questões específicas – por exemplo, o que está influenciando os principais resultados ou quais caminhos existem entre conjuntos de atividades ou entradas e resultados.

Limitações

Este estudo de caso é baseado em um trabalho em andamento e aqui implementamos apenas dois métodos de estimativa de rede, usando um conjunto de dados que ainda está em construção. De modo mais geral, as principais limitações de qualquer exercício de mapeamento de sistemas orientados a dados provavelmente giram em torno de dificuldades em transformá-los em processos participativos, comunicar a riqueza dos mapas e resultados a outras pessoas de maneira acessível e obter dados utilizáveis e abrangentes sobre todos os fatores de interesse.

Resultados de um exemplo: energia eólica e biocombustíveis

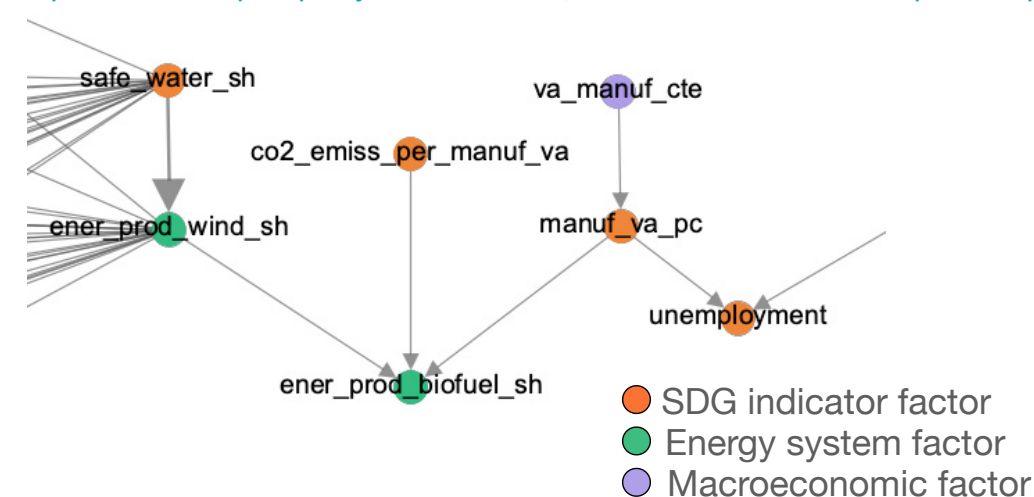
Para ilustrar nossa abordagem, nesta seção apresentamos os resultados preliminares sobre como a energia eólica interage com outras dimensões do desenvolvimento sustentável no Brasil e demonstramos como geramos um primeiro conjunto de resultados para investigar melhor o papel dos biocombustíveis no sistema ODS-energia brasileiro.

Nosso mapa completo (não mostrado aqui) sugere que a energia eólica está conectada a vários nós na rede

de correlação e, como resultado, a energia eólica é a mais bem conectada entre os fatores relacionados à transição energética e um dos cinco principais nós em três medidas de rede padrão: intermediação (que captura se o nó é uma “ponte” ou “gargalo”), proximidade (que captura se um nó está “no meio dele”) e grau (número de conexões). Especificamente, nossos resultados preliminares sugerem que a energia eólica está associada ao total de emissões de gases de efeito estufa (ODS 13) e ao acesso à eletricidade (ODS 7), mas também indicam outras interações um tanto menos intuitivas, com resultados no setor de saúde (ODS 3),²⁴⁷ com acesso à água (ODS 6) e ao saneamento (ODS 6), com áreas protegidas (ODS 14 e 15) e com consumo de materiais (ODS 12).

Além de estar conectado a vários nós na rede de correlação, na rede do algoritmo PC a parcela de energia eólica está associada à parcela de biocombustíveis, uma das principais fontes de energia no Brasil. Motivados por essa conexão, investigamos ainda mais a influência dos biocombustíveis no sistema ODS-energia. Olhando a montante dos biocombustíveis (Figura 78), podemos ver que o valor agregado da indústria e as emissões de CO2 por unidade de valor agregado na indústria (ambos indicadores do ODS 9) têm uma relação com eles. Como os biocombustíveis incluem produtos da cana de açúcar, madeira, óleos vegetais e fontes de energia residuais, que por sua vez podem ser transformadas em energia térmica, mecânica e luminosa, a plausibilidade dessas associações e quaisquer mecanismos por trás delas seriam tópicos interessantes para pesquisas futuras, assim como discussões com *stakeholders* nos setores de energia e industrial, especialmente considerando que a industrialização é uma dimensão importante dos ODS.

Figura 78: Rede egocêntrica²⁴⁸ de biocombustíveis. Isso mostra a rede egocêntrica de duas etapas (ou seja, todos os nós conectados diretamente ou por meio de uma etapa) da produção de biocombustíveis, mas corta muitos dos nós conectados por meio da produção de energia eólica.



²⁴³ Barbrook-Johnson, P. and Penn, A. (2022). Systems Mapping: how to build and use causal models of systems. Palgrave.

²⁴⁴ Spirtes, P. et al. (1993). Causation, Prediction, and Search – Lecture Notes in Statistics 81. Glymour, C., Scheines, R and Spirtes, P. (2001), Causation, Prediction, and Search, 2nd edn, MIT Press, Cambridge..

²⁴⁵ Heinze-Deml, C. et al. (2018). Causal Structure Learning. Annual Review of Statistics and Its Application 5: 371-391.

²⁴⁶ Barbrook-Johnson, P. and Penn, A. (2021). Participatory Systems Mapping for Complex Energy Policy Evaluation. Evaluation 27(1): 57-79. Barbrook-Johnson, P. and Penn, A. (2022), Participatory Systems Mapping, Systems Mapping, Palgrave Macmillan.

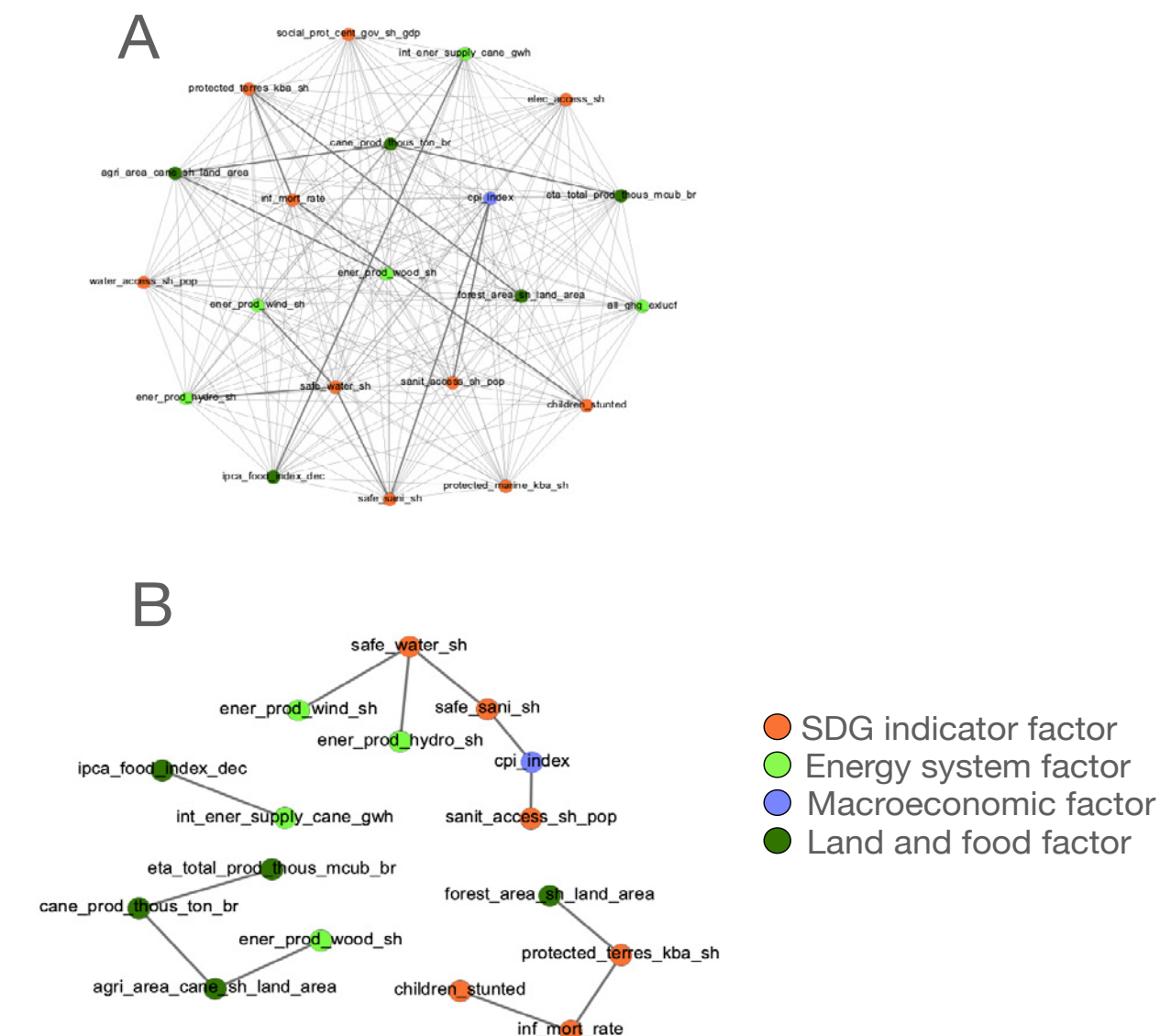
²⁴⁷ Proporção de mulheres com anemia, mortalidade infantil e neonatal, crianças com atraso no crescimento.

²⁴⁸ Uma rede de ego é um subconjunto de uma rede focada em um nó específico e seus vizinhos.

Para demonstrar como a exploração de submapas pode inspirar novas revisões de literatura, coletas de dados e mapeamentos, repetimos o exercício, desta vez com foco no papel dos biocombustíveis e no uso da terra como ponto de partida. A ideia é explorar as interdependências entre biocombustíveis, uso da terra e preços de alimentos no Brasil, à luz de uma vertente da literatura que considera comovimentos nos preços do petróleo e da produção agrícola, já que esta última é cada vez mais utilizada como insumo para a produção de energia.²⁴⁹

Coletamos dados adicionais para desagregar os biocombustíveis, com foco na cana de açúcar. Especificamente, incluímos a produção de cana de açúcar e etanol, bem como dados sobre o fornecimento de eletricidade a partir da cana de açúcar. Outras fontes de energia renovável incluídas são lenha, solar, eólica e hídrica. Também incluímos dados sobre a participação da cana de açúcar e da floresta na área terrestre do Brasil e um índice de preços de alimentos. Os submapas resultantes são mostrados na Figura 79. Esse exercício mostra os fatores de biocombustíveis muito mais conectados no mapa, com todos eles ocupando uma posição central.

Figura 79: Redes egocêntricas de biocombustíveis 2. A) A rede egocêntrica de duas etapas dos fatores relacionados a biocombustíveis. B) A mesma rede, mas com apenas as arestas aparecendo nas redes de correlação e algoritmo de PC mostradas.



Quando reduzimos o mapa incluindo apenas as conexões que aparecem tanto no algoritmo do PC quanto nas redes de correlação, vemos uma imagem diferente. Em primeiro lugar, vemos uma cadeia intuitiva da área produzindo cana de açúcar, para produção de cana de açúcar e para produção de etanol. Embora o algoritmo PC não tenha sido capaz de dar a direção dessas bordas, para fins de política, o conhecimento especializado e/ou dados coletados adicionalmente podem ser usados para completar esta seção do mapa. Também vemos uma relação entre a oferta de energia elétrica vinda da cana de açúcar e o preço dos alimentos, mas essa oferta de energia elétrica não está vinculada ao restante da cadeia – questão que poderia ser discutida com especialistas do setor.

Da mesma forma, a ligação entre a área de produção de cana de açúcar e a participação na produção de energia a partir da madeira poderia ser melhor investigada, assim como a falta de ligação entre a área de floresta (ODS 15) e a produção de cana de açúcar, especialmente considerando que a influência da produção de cana de açúcar sobre o desmatamento é uma questão importante a ser considerada nas políticas de energia (ODS 7) e de conservação florestal (ODS 15).

Em suma, nossos mapas baseados em dados mostram a energia eólica bem conectada a outros nós no sistema ODS-energia, potencialmente interagindo com os resultados nos setores de saúde, água e saneamento (ODS 3 e 6), além de estar ligada às emissões (ODS 9 e 13) e acesso à eletricidade (ODS 7). A energia eólica também pode estar conectada aos biocombustíveis, que, quando mais desagregados com foco na energia da cana de açúcar e uso da terra, também se mostram bem conectados na rede de correlação. Finalmente, a rede de algoritmos PC de biocombustíveis oferece sugestões interessantes para futuras investigações sobre as interações entre produção de cana de açúcar, área florestal e emissões.

Conclusão

Este exercício preliminar de mapeamento de sistemas baseado em dados mostrou como a energia eólica e os biocombustíveis parecem estar mais conectados aos ODS e aos indicadores econômicos no Brasil do que a energia solar. Isso sugere que os esforços para buscar sinergias e oportunidades, ou abordar compensações e riscos entre a transição e os ODS, podem mais concentrados na energia eólica e nos biocombustíveis. Em trabalhos futuros, devemos explorar essas relações com mais detalhes e apresentar os resultados aos *stakeholders* políticos encarregados de apoiar o progresso brasileiro nos ODS, para inspirar novas rodadas de análise orientadas pelas questões que esses atores colocam.

Acreditamos que essa abordagem de mapeamento de sistemas orientados por dados é uma ferramenta útil para complementar modelos com foco mais restrito e para combinar com abordagens de mapeamento de sistemas qualitativos (como visto no estudo de caso [Qual é a forma mais econômica de precificação de carbono? modelando o mercado de emissões e a taxa de carbono em geral e na China](#)). O mapeamento de sistemas provou ser útil e popular entre os analistas trabalhando na formulação de políticas, desde o desenho até a apreciação e a avaliação de políticas,²⁵⁰ e acreditamos que devemos fazer mais uso dos diferentes tipos de mapeamento de sistemas, incluindo abordagens mais baseadas em dados. Especificamente, dentro de uma nova estrutura de pensamento e de modelagem econômica, o mapeamento de sistemas é uma etapa inicial fundamental na análise de oportunidade e risco,²⁵¹ sendo um método útil para abrir a economia, tornando seus *insights* mais acessíveis e incentivando o pluralismo.

²⁴⁹ Hassler, J. and Sinn, H. (2016). The Fossil Episode. *Journal of Monetary Economics* 83: 14–26. Peersman, G. et al. (2021). The Interplay between Oil and Food Commodity Prices: Has it changed over time? *Journal of International Economics* 133: 103540.

²⁵⁰ Peñasco, C. et al. (2021). Systematic Review of The Outcomes and Trade-Offs of Ten Types of Decarbonisation Policy Instruments. *Nature Climate Change* 11.3: 257–265.

²⁵¹ Mercure, J.-F. et al. (2021) Risk-Opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal, *Global Environmental Change*, 70: 102359.

ESTUDO DE CASO:

A complexidade verde e a competitividade das exportações da China

JORIS BÜCKER (UNIVERSIDADE DE OXFORD), PIA ANDRES (LSE/UNIVERSIDADE DE OXFORD), MATTHEW IVES (UNIVERSIDADE DE OXFORD), PENNY MEALY (BANCO MUNDIAL/UNIVERSIDADE DE OXFORD), KEVIN TANG (UNIVERSIDADE DE OXFORD), MICHAEL URBAN (LOMBARD ODIER), MATTHEW MCCARTEN (LOMBARD ODIER), SUGANDHA SRIVASTAV (UNIVERSIDADE DE OXFORD), CAMERON HEPBURN (UNIVERSIDADE DE OXFORD)

Questão de política: Como a vantagem comparativa das nações deve ser afetada pela transição energética? Quais são as melhores políticas para ajudar os países a explorar as vantagens comparativas em mudança e se posicionar para a prosperidade futura?

Região: China

Método: Índice de complexidade verde baseado na literatura de complexidade econômica

Principais resultados: (i) Compreender o índice de complexidade verde existente de um país e seu potencial de complexidade verde indica as direções para uma provável vantagem comparativa futura; (ii) políticas estratégicas de longo prazo podem levar uma nação a áreas de potencial vantagem comparativa; (iii) a China conseguiu fazer isso nas últimas duas décadas, com sua ascensão como exportadora de produtos verdes provando ser ainda mais poderosa do que sua posição como principal fabricante global.

Engajamento: Os métodos neste estudo de caso foram desenvolvidos em um contexto acadêmico como um arcabouço geral sobre capacidades. Muitos dos dados e resultados para a maioria dos países em todo o mundo foram disponibilizados publicamente no *Green Transition Navigator* (<https://green-transition-navigator.org/>). Esse recurso tem sido usado para vários relatórios sobre as capacidades de exportação verde de vários países. O presente estudo de caso sobre a China surgiu como parte de uma colaboração entre a equipe de Oxford e Lombard Odier, um banco privado suíço, e uma versão dele foi apresentada em um evento paralelo da COP26 em Glasgow, entre outros lugares.

Resumo: Os autores usam uma abordagem de análise de dados para explorar os dados do comércio global e a vantagem comparativa que diferentes países têm em produtos verdes. O estudo apresenta a abordagem do Índice de Complexidade Verde (*Green Complexity Index* – GCI), que se baseia na literatura de complexidade econômica. Essa literatura teve uma enorme influência sobre como pensamos o desenvolvimento dos países; aqui ela é aplicada à competitividade verde da China e mostra que a ascensão da China como exportadora de produtos verdes é ainda mais forte do que sua ascensão como fabricante global líder.

Introdução

Este estudo de caso apresenta a aplicação de medidas baseadas na complexidade econômica para entender a competitividade verde na China. A transição para uma economia de baixo carbono exigirá a mudança para tecnologias mais verdes em muitos setores, o que implica que os países com alta produção de tecnologias verdes serão prováveis beneficiários da transição verde. Adquirir a capacidade de exportar produtos verdes sofisticados pode fazer parte de uma estratégia de crescimento verde, mas pode não ser fácil em todos os lugares. Aqui, avaliamos 25 anos de comércio global de produtos verdes para entender as tendências recentes na competitividade verde da China e na complexidade do produto, além de avaliar o que pode estar por vir. Esse tipo de análise pode fornecer informações sobre a dinâmica industrial e os impactos esperados em diferentes países à medida que a transição verde se desenrola. Este estudo de caso é um resumo da aplicação da abordagem de Mealy e Teytelboym (2020)²⁵² à China e outros países por Andres et al. (2021)²⁵³.

Medindo a competitividade verde

Os produtos “verdes” que rastreamos são uma lista de 295 produtos definidos por Mealy e Teytelboym, que combinam listas de bens ambientais compiladas pela OMC, OCDE e APEC. As subcategorias incluem produtos de energia renovável, consumo eficiente de tecnologias de energia, produtos de captura e armazenamento de carbono e gerenciamento de águas residuais e tratamento de água potável. Os países potencialmente bem posicionados para ganhar com a transição de baixo carbono são aqueles que fabricam e exportam equipamentos sofisticados para fazer a transição acontecer, como painéis solares, turbinas eólicas, eletrolisadores e baterias e seus componentes.

Nossa metodologia identifica os países que têm capacidades de exportação que lhes permitam exportar produtos verdes no futuro. Isso se baseia na ideia de que o desenvolvimento industrial é geralmente *path-dependent*.²⁵⁴ Evidências

empíricas mostram que os países e regiões têm uma probabilidade significativamente maior de desenvolver competitividade em produtos e serviços que exigem capacidades semelhantes às que já possuem.²⁵⁵ Há mais evidências que sugerem que os países que se especializam em produtos tecnologicamente mais sofisticados tendem a desfrutar de maior renda e crescimento do PIB.²⁵⁶

Para capturar esses fenômenos, empregamos uma abordagem introduzida pela primeira vez por Hidalgo et al.²⁵⁷ e estendida por Mealy e Teytelboym para medir a competitividade na exportação de produtos verdes. A proximidade de um produto com as capacidades atuais de um país está fortemente associada à probabilidade de que esse país venha a desenvolver competitividade relativa nesse produto no futuro (caso ainda não o exporte competitivamente).²⁵⁸

Utilizamos o algoritmo desenvolvido por Hidalgo e Hausmann²⁵⁹ para calcular o Índice de Complexidade do Produto (*Product Complexity Index* – PCI), que é uma *proxy* da sofisticação tecnológica. Ocasionalmente, nos referiremos ao Índice de Complexidade Econômica (ICE), que mede a complexidade geral da cesta de exportações de um país. Já ficou demonstrado que o ICE de um país é um preditor significativo do crescimento futuro do PIB desse país.²⁵⁹

Aplicamos a abordagem de Mealy e Teytelboym aqui e combinamos essas medidas de complexidade com as listas da OMC, OCDE e APEC de produtos verdes comercializados para desenvolver índices de complexidade verde ou de competitividade verde. Usamos duas métricas principais para avaliar o progresso dos países na capitalização do crescente mercado de produtos verdes.

1. **O Índice de Complexidade Verde (*Green Complexity Index* – GCI)** mede o número e a complexidade dos produtos verdes que um país exportou competitivamente. Constitui uma medida composta de competitividade verde e nos permite comparar os países diretamente em suas atuais forças de exportação verde.

²⁵² Mealy, P and Teytelboym, A. (2020). Economic Complexity and the Green Economy. Research Policy: 103948.

²⁵³ <https://www.inet.ox.ac.uk/publications/predictors-of-success-in-a-greening-world/>

²⁵⁴ Grubb, M. et al. (2014). Planetary Economics: Energy, Climate Change and the Three Domains of Sustainable Development. Planetary Economics.

²⁵⁵ Hidalgo, C. et al. (2007). The Product Space Conditions the Development of Nations. Science, 317: 5837; Neffke, F. et al. (2011). How Do Regions Diversify over Time? Industry Relatedness and the Development of New Growth Paths in Regions. Economic Geography, 87.3.

²⁵⁶ Hidalgo, C. et al. (2007). The Product Space Conditions the Development of Nations. Science 317: 5837; Hausmann, R. et al. (2007). What You Export Matters. Journal of Economic Growth, 12.1.

²⁵⁷ Hausmann, R. and Hidalgo, C. A. (2009). The Building Blocks of Economic Complexity. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(26): 10570-10575.

²⁵⁸ Hidalgo, C. et al. (2007). The Product Space Conditions the Development of Nations. Science, 317: 5837; Neffke, F. et al. (2011). How Do Regions Diversify over Time? Industry Relatedness and the Development of New Growth Paths in Regions. Economic Geography, 87.3.

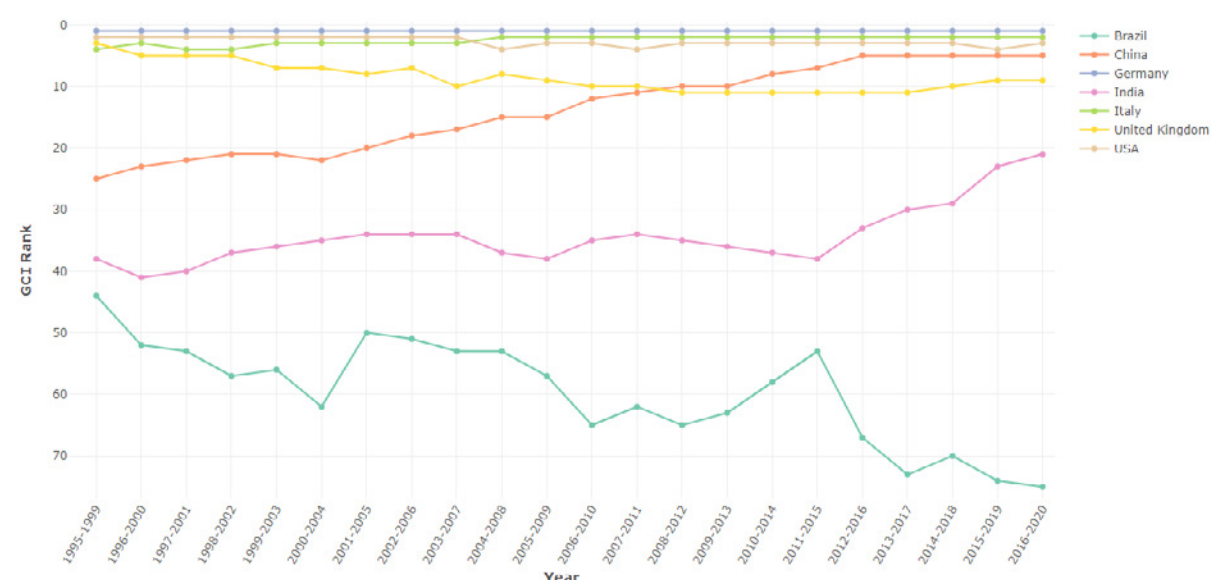
²⁵⁹ Hidalgo, C. et al. (2007). The Product Space Conditions the Development of Nations. Science 317: 5837; Hausmann, R. et al. (2007). What You Export Matters. Journal of Economic Growth, 12.1.

2. **O Potencial de Complexidade Verde (Green Complexity Potential - GCP)** mede a proximidade de cada país em relação a produtos verdes complexos que ainda não exportam de forma competitiva. Usamos uma medida de proximidade entre produtos baseada na frequência com que dois produtos são coexportados. A proximidade entre um produto e um país indica a similaridade de um produto com as atuais capacidades de exportação de um país. Identificar produtos que estão intimamente relacionados com as capacidades de um país nos permite vislumbrar como esses caminhos futuros podem ser, devido à condição de *path-dependence* frequentemente observada no desenvolvimento industrial. O GCP demonstrou ser um preditor significativo do futuro GCI de um país.²⁶⁰

Para evitar que nossa análise seja distorcida por flutuações de curto prazo no comércio, usamos valores médios anuais em períodos contínuos de cinco anos (1995-1999, 1996-2000, etc). Mais detalhes sobre a metodologia constam no relatório²⁶¹ em que este estudo de caso se baseia e em Mealy e Teytelboym (2020).²⁶²

A Alemanha e a Itália tiveram consistentemente pontuações altas no GCI entre 1995 e 2020 (ver Figura 80), e a Alemanha atualmente ocupa o primeiro lugar. O Reino Unido manteve-se consistentemente no top 10. A Índia subiu perto do top 20, enquanto o Brasil caiu para a casa dos 70. No entanto, sem dúvida, a tendência positiva mais marcante é a ascensão da China.

Figura 80: GCI ao longo do tempo para países selecionados.



Oportunidades e tendências de complexidade verde na China

Na última década, a China se tornou a maior economia manufatureira do mundo. É também o maior emissor mundial de gases de efeito estufa. No entanto, seu domínio global na fabricação é espelhado por suas capacidades de produção de tecnologia limpa. A China atualmente ocupa o 42º lugar em complexidade econômica geral (ECI), mas o quinto em complexidade verde (GCI).

A estratégia industrial da China visa ao progresso da fronteira tecnológica. O programa *Made in China*

2025, anunciado em 2015 como uma peça importante da política industrial, identificou 10 setores nos quais a China pretende se tornar líder mundial até 2025. Isso inclui veículos verdes e tecnologia de transporte ferroviário. Seu foco em indústrias de alta tecnologia pode elevar sua classificação de complexidade econômica e verde. O 14º Plano Quinquenal da China (para 2021-2025) enfatiza um conjunto semelhante de indústrias. Ele também descreve planos para mais autossuficiência científica e tecnológica e uma colaboração mais forte entre a indústria e as instituições de pesquisa.²⁶⁴ Mais recentemente, a Conferência Central de Trabalho Econômico do governo de 2022 novamente delineou as prioridades tecnológicas

consideradas essenciais para forjar a competitividade industrial externa da China, com tecnologias de energia centrais; no entanto, havia mais ênfase na autossuficiência do que anteriormente.

Em seguida, discutiremos as tendências passadas nas categorias de produtos ecológicos da China e, em seguida, destacaremos produtos detalhados que formam pontos fortes e possíveis opções de diversificação e terminaremos com uma análise da indústria de veículos elétricos da China.

Tendências na competitividade verde da China

A participação da China nas exportações verdes globais aumentou de 3% em 1995-1999 para 19% em 2015-2019. Sua participação nas importações verdes também aumentou, mas em menor grau: de 2,87% no início do período para 8% no período mais recente. A China é um exportador líquido de produtos verdes (refletindo seu domínio nas exportações globais de manufaturados de forma mais ampla).

A classificação do GCI da China aumentou de 25º no período de 1995-1999 para o quinto no último

período de 2015-2019, enquanto sua classificação no GCP aumentou de sétimo para primeiro. Isso indica que a China não apenas aumentou sua participação nas exportações verdes, mas também mudou para tecnologias verdes relativamente complexas. Seu alto GCP, em particular, indica que a China está bem posicionada para aumentar ainda mais sua competitividade verde global no futuro. Os produtos de energia renovável compõem o tipo de exportação verde mais importante da China, assim como de importação.

Os valores das exportações aumentaram em muitas categorias ao longo do período do estudo, mas especialmente nas mais complexas (Figura 81). As três principais categorias são produtos de energia renovável, seguidos por produtos em tecnologias de consumo eficiente de energia e captura e armazenamento de carbono, depois gerenciamento de águas residuais e tratamento de água potável. Como mostra a Figura 82, a proximidade média da China com produtos verdes aumentou para todas as categorias ambientais. Isso indica que as capacidades produtivas da China estão se alinhando cada vez mais às necessárias para produzir tecnologias verdes de forma competitiva. Isso também é capturado por sua alta classificação no GCP.

Figura 81: Valor das exportações ao longo do tempo por categoria de produto ambiental.

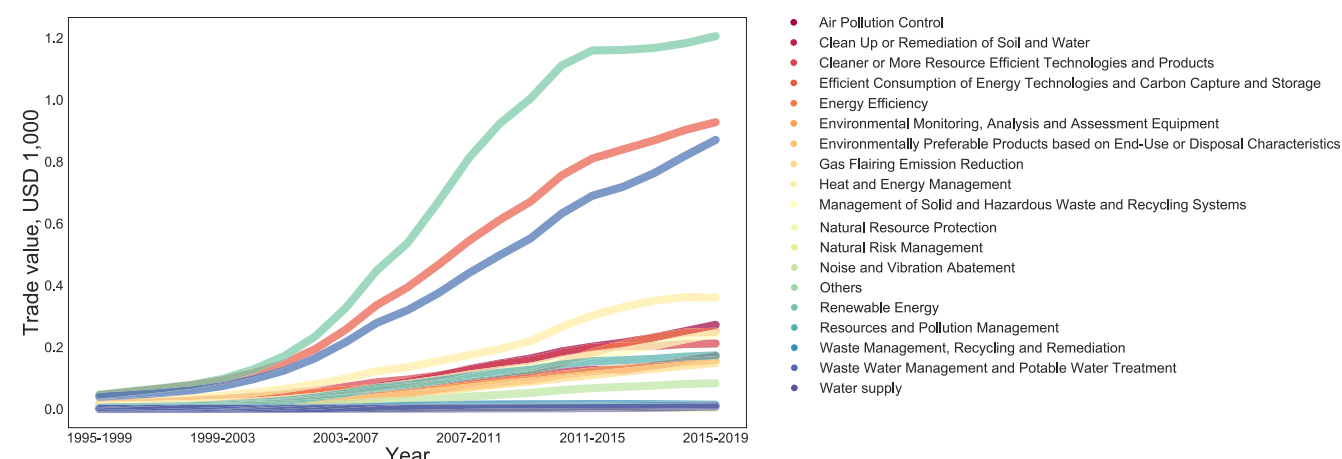
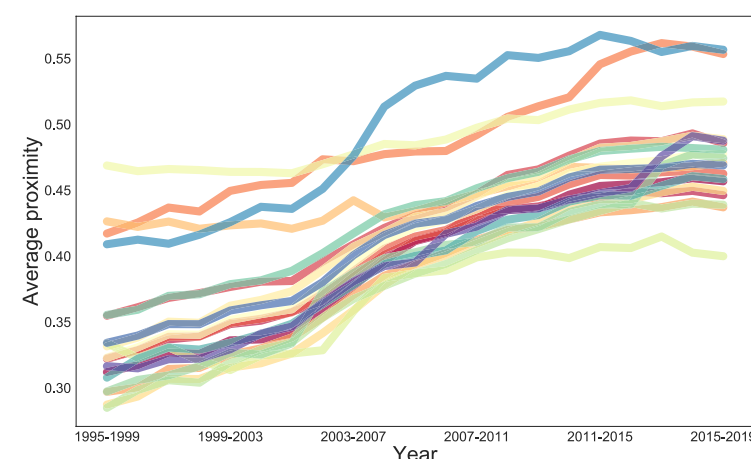


Figura 82: Proximidade média de produtos por categoria de produto ambiental.



²⁶⁰ Mealy, P and Teytelboym, A. (2020). Economic Complexity and the Green Economy. Research Policy: 103948.

²⁶¹ <https://www.inet.ox.ac.uk/publications/predictors-of-success-in-a-greening-world/>

²⁶² Mealy, P and Teytelboym, A. (2020). Economic Complexity and the Green Economy. Research Policy: 103948.

²⁶³ State Council of The People's Republic of China. (2015). Made in China 2025. <http://english.www.gov.cn/policies/latest_releases/2015/05/19/content_281475110703534.htm>

²⁶⁴ Mallapaty, S. (2021). China's Five-Year Plan Focuses on Scientific Self-Reliance. Nature: 353-54. <<https://doi.org/10.1038/d41586-021-00638-3>>.

Pontos fortes e oportunidades verdes da China

A primeira proposta de NDC da China pedia mais gastos em P&D em energia renovável e tecnologias relacionadas, incluindo dessalinização e metodologia de avaliação de risco de mudança climática.²⁶⁵

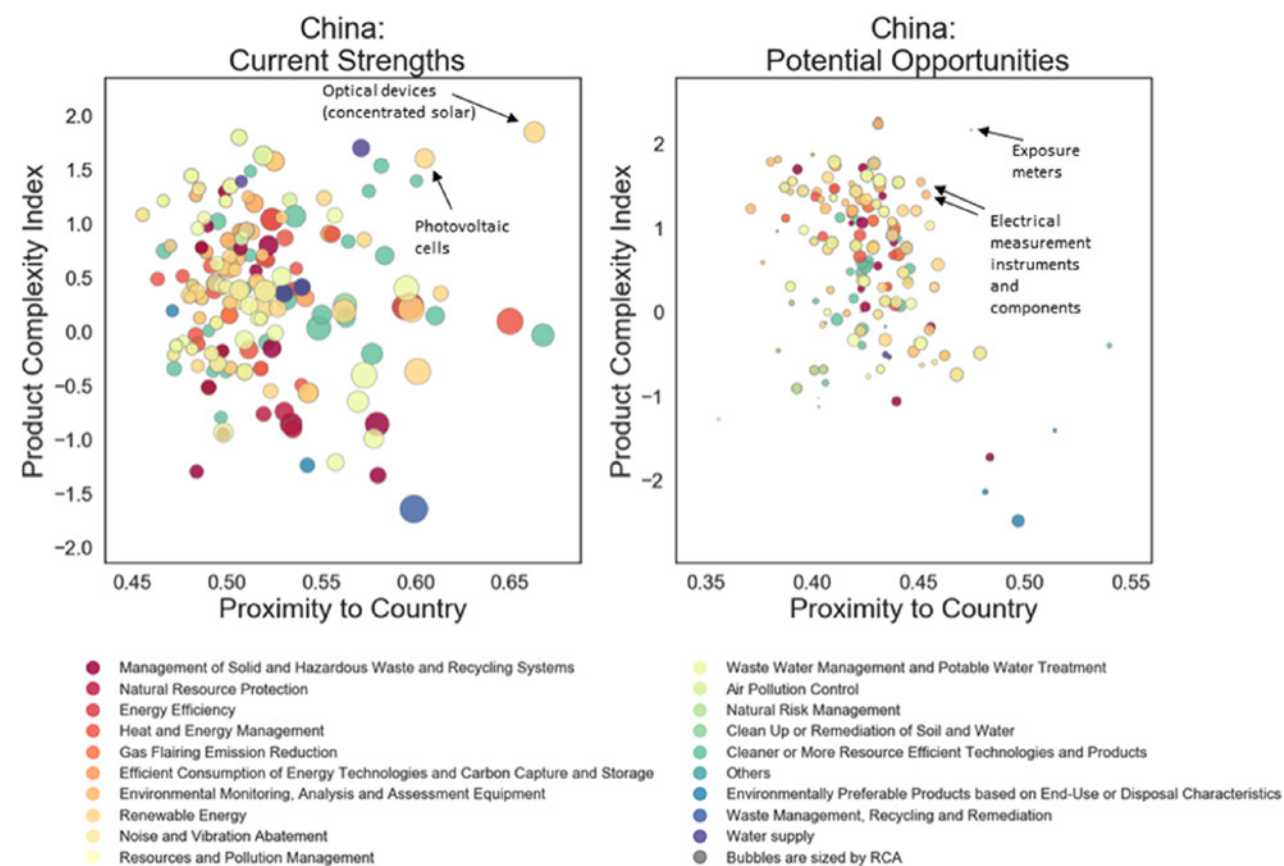
Algumas tecnologias de monitoramento ambiental são altamente complexas e próximas dos pontos fortes atuais da China, como medidores de exposição ou instrumentos de medição elétrica e seus componentes, os quais podem ser usados no monitoramento ambiental.

A Figura 83 divide todos os produtos verdes entre aqueles que a China exporta competitivamente (com base na vantagem comparativa revelada²⁶⁶ e rotulados como “Forças Atuais”) e aqueles

que atualmente não exporta (rotulado como “Oportunidades Potenciais”). O eixo horizontal mostra a proximidade dos produtos com as capacidades produtivas atuais da China, o que é uma indicação de quão rapidamente o país pode desenvolver competitividade naqueles produtos no futuro, onde ainda não a possui.

A Figura 83 mostra que, para a China, os produtos mais próximos tendem a ter uma pontuação PCI mais baixa, indicando que há um *trade-off* entre a transição para novos produtos “próximos” versus “complexos”. Os produtos de alta complexidade têm maior probabilidade de agregar valor e abrir maiores oportunidades de diversificação, mas se os produtos de alta complexidade tendem a estar relativamente mais distantes das capacidades existentes, a transição para elas será mais arriscada.

Figura 83: Produtos verdes de exportação da China divididos em pontos fortes atuais (esquerda) e oportunidades potenciais (direita). O tamanho do círculo do produto indica o RCA atual da China; cores representam categorias de produtos.



Veículos de baixa emissão

Uma das indústrias alvo do “*Made in China 2025*” e a dos veículos verdes. Existem políticas em vigor para os consumidores chineses comprarem carros híbridos e elétricos desde 2009 e, em 2035, todos os novos veículos vendidos devem ser elétricos, híbridos ou movidos a célula de combustível, de acordo com um relatório do Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação.²⁶⁷ Os veículos elétricos e híbridos representam cerca de 5% das vendas de carros novos em 2020 e talvez 20% em 2025, tornando-se o maior mercado de veículos elétricos do mundo em números absolutos.²⁶⁸

Em nossa análise, a participação da China na exportação global de veículos de nova energia (que inclui veículos movidos a gás natural, além de elétricos, híbridos e movidos a hidrogênio) é de apenas cerca de 1% para 2015–2019, em comparação com 12–25% para Alemanha, Japão e Estados Unidos – todos os três países com grandes setores automotivos. A China ainda não havia desenvolvido capacidades competitivas de exportação nesta área em 2015–2019, com um RCA de 0,06 e proximidade com capacidades produtivas de exportação comparativamente baixas em cerca de 0,4.

No entanto, desde 2017, os veículos elétricos (EVs) têm seu próprio código de exportação (separado de outros veículos de “nova energia”), mas isso não está incluído em nossos dados longitudinais que cobrem o período de 1995–2019. Rastreamos esse novo código de exportação, pode-se descobrir que a China foi o terceiro maior exportador líquido de EVs em 2021, com exportações quadruplicando em relação a 2020, capturando 13,7% dos mercados globais de exportação de EVs,²⁶⁹ o que significa que a China só ganhou capacidades de exportação (RCA = 1,02 > 1) em EVs em 2021.²⁷⁰

Separadamente, podemos encontrar no conjunto de dados que a China já tinha capacidade de exportação (RCA = 1,1 > 1) no período 2015–2019 em ônibus não movidos a diesel e, portanto, menos poluentes²⁷¹ e é um player importante nesse mercado de exportação. Mas esses são um produto diferente com menor complexidade (PCI de 0,43) dos veículos de nova energia (PCI de 1,87).

Conclusão

Este estudo de caso apresentou duas medidas relativamente novas de complexidade econômica – o Índice de Complexidade Verde e o Potencial de

Complexidade Verde – que podem ser usadas por formuladores de políticas para entender áreas refinadas de vantagem comparativa atual e futura à medida que a transição para o zero líquido se desenrola. Essas medidas foram aplicadas à China, com vista a compreender a evolução do país ao longo do tempo e onde ele se posiciona na corrida para promover a transição energética. Verificou-se que a China promoveu uma transformação dramática de sua economia na forma do aumento da complexidade verde nas últimas décadas, atingindo, no período final do estudo (2015–2019), o quinto lugar em complexidade verde e o primeiro em potencial de complexidade verde.

A partir de pesquisas anteriores, fica claro que esse sucesso não aconteceu por acaso e é impulsionado pela política industrial direcionada da China, que incluiu subsídios específicos da indústria, crédito preferencial e medidas que visam agressivamente a transferência de tecnologia. Discutimos a estratégia do programa *Made in China 2025*, que visa a sustentabilidade e algumas tecnologias ecológicas importantes, como veículos elétricos, onde a China ganhou capacidade de exportação em 2021, bem como digitalização e indústrias de alta tecnologia. Mas nem todo país achará viável ou desejável a adoção dessa política industrial intervencionista. A experiência da China mostra o que é possível, e outros países observarão que deixar a evolução da economia exclusivamente nas mãos das forças do mercado pode significar a perda de oportunidades para explorar retornos crescentes.

Olhando para o futuro, os formuladores de políticas podem usar o Índice de Complexidade Verde e o Potencial de Complexidade Verde de seu país para sinalizar áreas de provável vantagem comparativa futura. Políticas estratégicas de longo prazo – sejam fortemente ou levemente intervencionistas – podem ajudar a direcionar as nações para áreas de potencial vantagem comparativa. No caso da China, nossa análise sugere que o país já é forte em um número tão grande de áreas que provavelmente fará sentido dobrar e manter a vantagem comparativa em muitas dessas áreas. Por exemplo, dada a disrupção em curso no setor automotivo e a escala do valor em jogo, pode ser sensato para a China continuar a fortalecer seu investimento em veículos elétricos. Os formuladores de políticas de outros países podem tirar conclusões diferentes da análise do potencial de complexidade verde de sua própria economia.

²⁶⁵ NDRC. (2015). China's Intended Nationally Determined Contribution: Enhanced Actions on Climate Change.

²⁶⁶ A vantagem comparativa revelada é uma medida da vantagem relativa de um determinado país na exportação de um determinado produto. Um RCA de um par país-produto de 0,5 significa que o país exporta metade do que é esperado, dadas as exportações médias globais desse produto e o valor total das exportações do país. Um país exporta um produto com vantagem competitiva ou capacidades se tiver um RCA > 1 para esse produto.

²⁶⁷ Tabeta, S. (2020). China Plans to Phase out Conventional Gas-Burning Cars by 2035. Nikkei Asia. < <https://asia.nikkei.com/Business/Automobiles/China-plans-to-phase-out-conventional-gas-burning-cars-by-2035> >

²⁶⁸ IEA. (2020). Reports: Electric Vehicles.

²⁶⁹ Workman, D. (2021). Electric Cars Exports by Country. World's Top Exports. < https://www.worldstopexports.com/electric-cars-exports-by-country/?utm_content=cmp-true >

²⁷⁰ Extraímos a porcentagem da China no comércio mundial em 13,5% usando dados de 2020 de <https://wits.worldbank.org/CountryProfile/en/WLD>

²⁷¹ Esta categoria inclui os veículos elétricos e a hidrogênio, mas também os movidos a combustíveis fósseis que não o diesel, como gás natural ou gasolina.

ESTUDO DE CASO:

Preenchendo a lacuna do financiamento verde no Reino Unido: transição para eletricidade de baixo carbono e implicações econômicas

SARAH HAFNER (UNIVERSIDADE ANGLIA RUSKIN), ALED JONES (UNIVERSIDADE ANGLIA RUSKIN)

Questão de política: Quais são as implicações macroeconômicas da transição para eletricidade de baixo carbono no Reino Unido implementada de forma combinada ou não com uma política para suprir a lacuna do financiamento verde?

Região: Reino Unido

Método: Modelo de dinâmica de sistemas

Principais resultados: Suprir a lacuna do financiamento verde num cenário de transição para energia de baixo carbono leva a benefícios casados de custos mais baixos do sistema de energia, menor desemprego, e aumento do PIB.

Engajamento: Este estudo de caso analisou 31 relatórios de políticas de grupos ou organizações multissetoriais que representam *stakeholders* do setor financeiro, além de 17 entrevistas estruturadas com investidores privados, proprietários e gerentes de ativos, representantes de bancos e fundos de pensão, e atuários. Discussões em mesas redondas também alimentaram este trabalho, no âmbito de eventos organizados pelo Aldersgate Group, Banco Mundial, Institute and Faculty of Actuaries e Observer Research Foundation (Índia). Este trabalho se também se vale dos esforços da Iniciativa Climática dos Mercados de Capitais (Capital Markets Climate Initiative – CMCI), liderada pelo então Ministro de Mudanças Climáticas do Departamento de Energia e Mudanças Climáticas.

Resumo: Os autores usam um modelo de dinâmica de sistemas para investigar se as políticas direcionadas ao setor de energia são suficientes para apoiar a transição de baixo carbono no Reino Unido. Especificamente, o estudo apresenta o Modelo de Barreira de Investimento Verde (*Green Investment Barrier Model*), que se concentra na modelagem do setor financeiro, incluindo variáveis como taxas de juros e taxas de câmbio, e vincula isso ao investimento no setor de energia para modelar a interação entre os dois setores que passam pela economia real. Ao contrário dos modelos tradicionais que se concentram apenas no setor de energia, descobrimos que as políticas de energia por si só não são suficientes para alcançar as ambições do zero líquido e é necessária a regulação financeira, juntamente com as políticas de energia, para aumentar o capital disponível de investidores institucionais e privados.

Introdução

Para atingir seus objetivos de política climática, o Reino Unido precisa descarbonizar rapidamente seu setor de energia. Isso exige altos investimentos em infraestrutura de energia de baixo carbono. Por exemplo, o DECC²⁷² estimou que os investimentos necessários em infraestrutura de energia de baixa emissão, incluindo transmissão e geração, são da ordem de £ 130 bilhões até 2030. Outras fontes, como o Comitê de Mudanças Climáticas (Climate Change Committee – CCC)²⁷³ e a Vivid Economics,²⁷⁴ estimaram que o investimento necessário seja maior, chegando a £ 300 bilhões até 2030. Fontes tradicionais de capital (por exemplo, financiamento de projetos) não serão suficientes para cobrir os investimentos necessários em infraestrutura de energia. Portanto, fontes de financiamento adicionais, como financiamento de investidores institucionais ou privados (por exemplo, investidores tradicionais ou indivíduos com alto patrimônio líquido), são necessárias para preencher a lacuna do financiamento verde.²⁷⁵ No entanto, atualmente os investidores privados e institucionais não estão investindo o suficiente em infraestrutura de energia verde, por exemplo, devido à falta de confiança em função dos riscos tecnológicos, políticas instáveis, altos requisitos de capital inicial de energias renováveis ou falta de informação.^{276 277}

Embora os atuais modelos de economia de energia revelem uma variedade de diferentes aspectos/ implicações das transições de energia de baixo carbono (e apliquem uma ampla gama de focos diferentes), até o momento nenhum deles – com a possível exceção do modelo EIRIN estendido²⁷⁸ – demonstrou como as políticas podem contribuir para aumentar o investimento verde necessário para financiar a infraestrutura de energia de baixo carbono e quais são as implicações macroeconômicas relacionadas. Nosso estudo visa preencher essa lacuna e, assim, ampliar o cenário atual de modelagem de economia de energia existente. Focamos na seguinte questão

- Quais são as implicações macroeconômicas da transição para eletricidade de baixo carbono no Reino Unido implementada de forma combinada

ou não com uma política projetada para suprir a lacuna do financiamento verde?

Para abordar esta questão, aplicamos o Modelo de Barreira de Investimento Verde estendido (*Green Investment Barrier Model* – GIBM),²⁷⁹ que inclui os principais resultados da investigação qualitativa sobre a lacuna de financiamento verde por Hafner et al.²⁸⁰

As atuais políticas energéticas, como tarifas *feed-in*, contratos por diferença ou subsídios, concentram-se principalmente nas decisões de investimento das empresas de energia. No entanto, os cenários de política apresentados neste estudo de caso também visam influenciar as decisões financeiras de investidores privados e institucionais necessários para fornecer financiamento a empresas de energia ou investir diretamente em infraestrutura de energia.

Abordagem de modelagem

O modelo apresentado neste estudo é um modelo de simulação descritivo que difere dos modelos mais comuns de equilíbrio e otimização. A abordagem de dinâmica de sistemas é uma ferramenta adequada para investigar os principais mecanismos de sistemas complexos caracterizados por loops de *feedback*, incerteza e *path-dependence*, e para gerenciar e/ou melhorar esses sistemas, intervindo em aspectos que fortalecem *loops de feedback* desejáveis ou enfraquecem loops de feedback indesejados.

O GIBM é calibrado para o contexto do Reino Unido e permite a simulação de diferentes cenários de transição para eletricidade de baixo carbono.²⁸¹ O modelo inclui a simulação endógena de variáveis macroeconômicas chave, como PIB ou desemprego, emissões (enquanto indicador ambiental chave) do setor de eletricidade, e custos do sistema elétrico. Pode-se dizer que os setores do modelo econômico do GIBM estão inseridos em uma estrutura conceitual macroeconômica pós-keynesiana/ecológica. As equações do modelo geralmente se baseiam em diferentes abordagens de modelagem de não-equilíbrio, incluindo economia pós-keynesiana, economia ecológica ou dinâmica de sistemas, mas também abordagens de equilíbrio (por

²⁷² UK Department of Energy & Climate Change. (2014). Energy Investment Report, April 2014. <https://www.gov.uk/government/publications/energyinvestment-report-april-2014> (Accessed April 19, 2019)

²⁷³ Committee on Climate Change. (2013). Next Steps on Electricity Market Reform – Securing the Benefits of Low-Carbon Investment. Committee on Climate Change. https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2013/05/1720_EMIR_report_web.pdf. (Accessed May 1, 2019).

²⁷⁴ Vivid Economics. (2012). Energy and the Economy – The 2030 outlook for UK Businesses. A London School of Economics Report Commissioned by RWE NPower. Available at: www.vivideconomics.com/publications/energy-and-the-economy-the-2030-outlook-for-uk-businesses (Accessed May 4, 2019)

²⁷⁵ OECD. (2016). Fragmentation in Clean Energy Investment and Financing. Available at: <http://www.oecd.org/investment/investment-policy/BFO-2016-Ch5-Green-Energy.pdf> (Accessed July 4, 2018).

²⁷⁶ Hafner, S. et al. (2019). A Scoping Review of Barriers to Investment in Climate Change Solutions. *Sustainability*, 11(11), 3201.

²⁷⁷ Hafner, S. et al. (2020). Closing the Green Finance Gap – A Systems Perspective. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 34: 26–60.

²⁷⁸ Dunz, N. et al. (2019). Climate Transition Risk, Climate Sentiments and Financial Stability in a Stock-Flow Consistent Approach. *Journal of Financial Stability* 54: 100872.

²⁷⁹ Hafner, S. et al. (2021). Modelling the Macroeconomics of a 'Closing the Green Finance Gap' Scenario for an Energy Transition. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 40: 536–568.

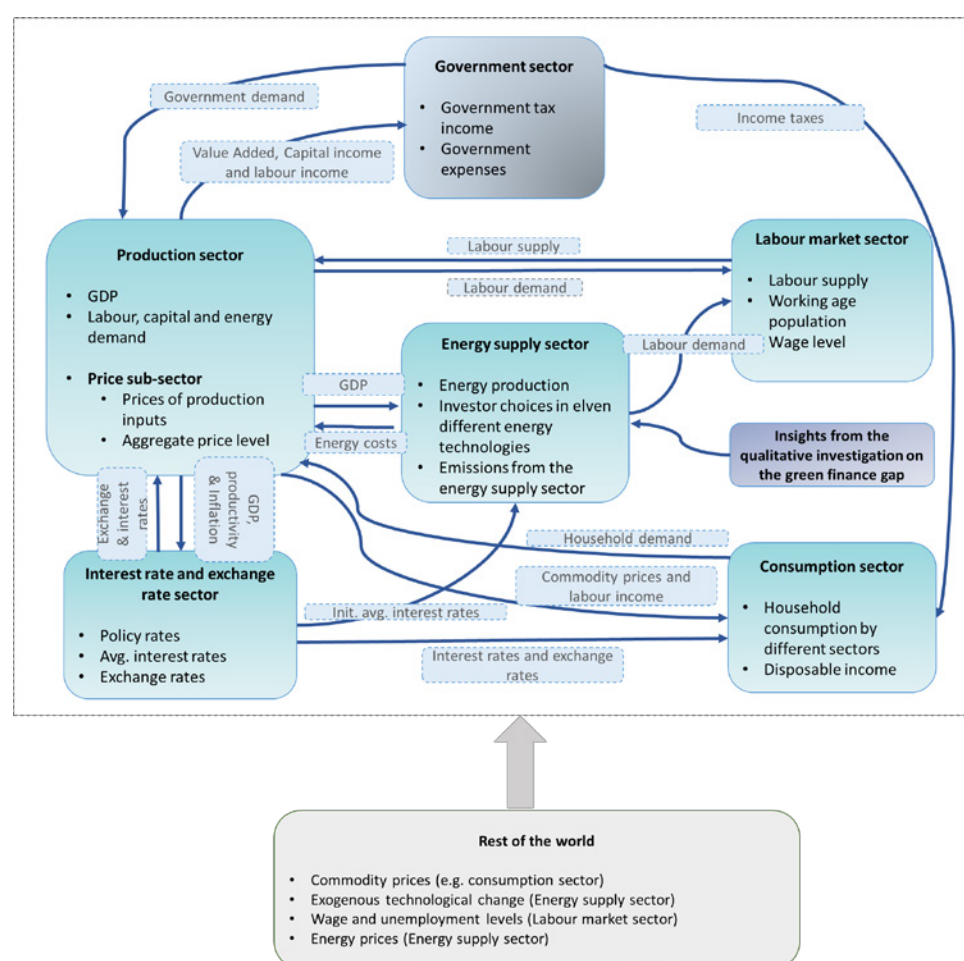
²⁸⁰ Hafner, S. et al. (2020). Closing the Green Finance Gap – A Systems Perspective. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 34: 26–60.

²⁸¹ Hafner, S. et al. (2021). Economic Impacts of Achieving a Net-Zero Emissions Target in the Power Sector. *Cleaner Production*, 312: 127610.

exemplo, *Constant Elasticity of Substitution* – CES – função de produção). O modelo tem um escopo mais restrito do que os modelos de grande escala, como, por exemplo, o E3ME da Cambridge Econometrics, mas é mais amplo do que um modelo matemático estilizado. Especificamente, o GIBM inclui 313 variáveis de estoque e mais de 3.000 variáveis no total. O horizonte de simulação para este estudo incluiu o período de 2016 a 2050, divididos em fases de 0,25 anos.

A Figura 84 dá uma visão geral sobre o GIBM e seus principais setores macroeconômicos (por exemplo, produção, consumo e mercado de trabalho), o setor público e o setor de fornecimento de eletricidade. O modelo permite entender quais são as implicações macroeconômicas e os custos do sistema elétrico em diferentes cenários de transição elétrica.

Figura 84: Visão geral do modelo GIBM. As principais relações causais entre setores do modelo. O GIBM é visualizado na caixa tracejada, ou seja, o resto do mundo está fora do GIBM. Os setores do modelo entre parênteses na caixa “Resto do mundo” indicam que entradas exógenas adicionais do resto do mundo fazem parte do modelo. O processo de produção no nível macroeconômico é representado por uma função de produção CES orientada pela demanda – ou seja, os insumos de produção, trabalho, capital, energia e insumos intermediários não são (necessariamente) totalmente utilizados. O setor de produção também inclui a simulação de preços; o setor de consumo simula o consumo das famílias por setor; o setor do mercado de trabalho determina o emprego e simula o desemprego como a diferença entre a demanda de trabalho proveniente do setor de produção e a força de trabalho disponível. Além disso, o mercado de trabalho representa o nível salarial e inclui um subsetor que simula endogenamente a população trabalhadora do Reino Unido; o setor de câmbio e taxa de juros inclui a taxa de câmbio entre o Reino Unido e seus principais parceiros comerciais e a taxa média de juros para créditos de empresas do Reino Unido; o setor público ou governamental rastreia as receitas e despesas do estado. Finalmente, o setor de fornecimento de eletricidade inclui uma representação detalhada da capacidade de produção de eletricidade e determina a energia anual produzida no Reino Unido. O setor de fornecimento de energia é diferenciado por 12 tecnologias de produção de eletricidade, incluindo biomassa, hídrica, marinha, eólica onshore, eólica offshore, solar, outras térmicas e outras energias renováveis como tecnologias renováveis, nuclear e gás CCS como outras tecnologias de baixo carbono e, finalmente, carvão e gás como tecnologias marrons^{1,2}.^{282 283}



Descrição dos recursos de complexidade do GIBM

A seguir, apresenta-se uma lista de recursos de complexidade capturados pelo GIBM de acordo com o arcabouço da análise de oportunidade-risco (*Risk-Opportunity Analysis* – ROA)^{1,2}.^{284 285}

- **Complexidade e múltiplos equilíbrios/não-equilíbrios:** No GIBM, os diferentes setores econômicos também estão interligados, assim como a economia com os setores energéticos. Além disso, devido à complexidade, os agentes não podem tomar decisões “racionais” e um resultado de equilíbrio de longo prazo não é dado.
- **Incerteza profunda:** A abordagem da dinâmica de sistemas reconhece a incerteza no nível da construção do modelo; a complexidade do sistema significa que os comportamentos futuros do sistema não são previsíveis com base na estrutura e nos comportamentos do sistema passado.
- **Não linearidade:** O setor de consumo inclui mudanças no parâmetro das elasticidades, uma vez que certos níveis de consumo são atingidos.
- **Ciclos de feedback, path-dependence e lock-in:** O setor de energia inclui reduções de custo de tecnologias renováveis devido ao aprender fazendo e o setor econômico inclui os efeitos multiplicadores do PIB keynesianos.
- **Comportamento do ator e tomada de decisão:** A abordagem de dinâmica de sistemas visa representar como os agentes tomam decisões, considerando tanto fatores econômicos quanto sociopsicológicos relevantes (por exemplo, valores ou preferências dos agentes). No GIBM, as decisões dos investidores financeiros são imitadas usando os resultados de um estudo qualitativo²⁸⁶ (que traz entrevistas com esses investidores) para incluir também “parâmetros flexíveis” sobre os quais atualmente não há dados quantitativos.

Descrição dos cenários e resultados

Simulamos e comparamos os seguintes cenários de política (as principais dinâmicas macroeconômicas induzidas pelos cenários apresentados são descritas em detalhes Hafner et al., 2021a):

- **O cenário de transição energética de baixo carbono (low-carbon energy transition scenario – LETS)** influencia as variáveis do setor energético

do modelo, pois implica que apenas fontes renováveis de energia sejam escolhidas para novas instalações. Além disso, implica diminuição linear da capacidade instalada de energia marrom a partir de 2020, levando a emissões zero até 2050 no setor de energia. O LETS é introduzido por suposição e as políticas necessárias não são especificadas. Dentro do LETS, nenhuma política específica é direcionada a investidores que abordem as atuais barreiras percebidas no investimento (conforme relatado por investidores e instituições tradicionais) para infraestrutura verde e, portanto, há um limite na disponibilidade de capital para tais projetos.

- **O cenário de políticas para o sistema financeiro (finance system's policy scenario – FSPS)** influencia as variáveis do setor financeiro do modelo. Presume-se que esse cenário de política enfrente as principais barreiras ao investimento verde de maneira eficaz e holística, com base em uma perspectiva sistêmica. É importante ressaltar que, embora os detalhes dessa política não sejam especificados neste estudo, com base em evidências empíricas contidas em Hafner et al. (2020a), assumimos que uma política para o sistema financeiro envolva mudanças nas regulações atuais, consultoria de investimento, requisitos de avaliação de risco (por exemplo, critérios ESG e divulgação de riscos relacionados ao clima), métricas e ferramentas aplicadas. A introdução dessa política, portanto, supre a lacuna do financiamento verde (a disponibilidade de capital corresponde aos requisitos projetados nos cenários futuros, de modo que todos os projetos passíveis de investimento sejam capazes de atrair capital suficiente). Isso significa que os fluxos de investimento verde para infraestrutura de energia renovável não são mais restringidos pela disponibilidade de financiamento em comparação com a execução básica que representa a situação atual de uma lacuna de financiamento verde. Ou seja, no GIBM, sem a introdução de uma política adequada, o financiamento verde fica abaixo do montante necessário para financiar a transição para a energia verde. Além disso, a introdução de uma política para o sistema financeiro reduz o *mark-up* nas taxas de juros de determinados projetos de energia renovável, ao mesmo tempo em que reduz a taxa média de juros em geral (ver Figura 85).

- Finalmente, os cenários apresentados acima foram testados combinados.

²⁸² Hafner, S. et al. (2021). Modelling the Macroeconomics of a ‘Closing the Green Finance Gap’ Scenario for an Energy Transition. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 40: 536–568.

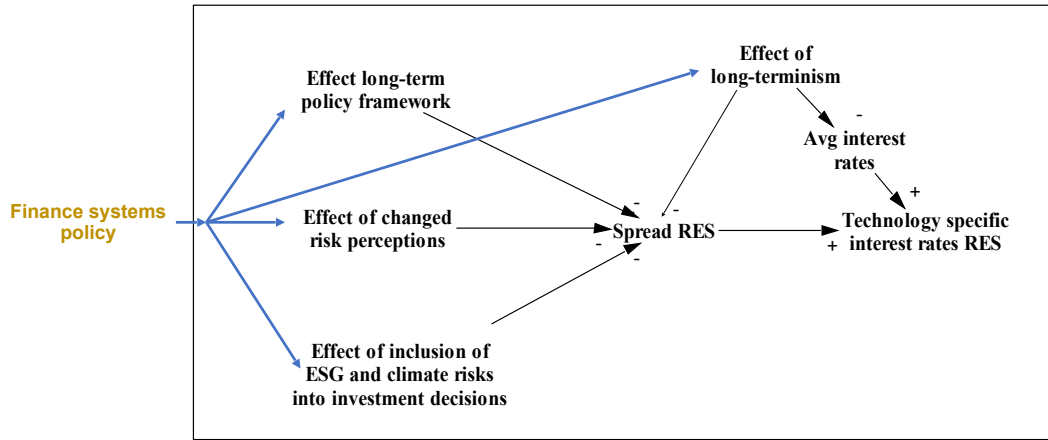
²⁸³ Hafner, S. et al. (2021). Economic Impacts of Achieving a Net-Zero Emissions Target in the Power Sector. *Journal of Cleaner Production*, 312: 127610.

²⁸⁴ Mercure, J.-F. et al. (2021). Risk-Opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal. *Global Environmental Change*, 70: 102359.

²⁸⁵ Grubb, M. et al. (2021). The New Economics of Innovation and Transition: Evaluating Opportunities and Risks.

²⁸⁶ Hafner, S. et al. (2019). A Scoping Review of Barriers to Investment in Climate Change Solutions. *Sustainability*, 11(11): 3201.

Figura 85: Impactos de uma política para o sistema financeiro: essa política busca lidar com as principais barreiras ao investimento verde de um ponto de vista sistêmico, da seguinte forma: (i) reduz as taxas médias de juros, (ii) reduz o spread da taxa de juros sobre o investimento em tecnologia de energia renovável e (iii) supre a lacuna do financiamento verde.^{287 288}



A seguir, apresentamos os resultados da simulação para os seguintes indicadores de política:²⁸⁹

- Emissões de gases de efeito estufa oriundos do sistema de energia
- Trabalhadores desempregados mais população inativa em idade ativa
- PIB
- Custos do sistema de energia
- Emprego gerado diretamente pela transição energética

Optamos por definir “desempregados” neste estudo como a soma de desempregados e trabalhadores inativos.²⁹⁰

A Tabela 14 mostra os resultados dos cenários de política energética simulados em termos dos indicadores de política escolhidos como porcentagens em relação aos resultados da simulação do mesmo indicador no cenário de referência (sempre em números acumulados, se não indicado de forma diferente). É importante ressaltar que, embora o Reino Unido tenha implementado um esquema de CFD, não usamos um cenário de CFD estilizado como parte do cenário de referência, pois o interesse reside em entender os custos adicionais de diferentes tipos de políticas em comparação com um cenário de referência em que nenhum esquema de política (além de preço) é introduzido.

Tabela 14: Visão geral dos resultados das políticas dos cenários testados – laranja destaca os piores resultados alcançados e azul o melhor alcançado de todos os cenários testados de políticas de baixo carbono; impactos nas variáveis acumuladas de 2016 a 2050.

	Emissões (%)	PIB (%)	Desemprego (%)	Emprego direto (%)	Custos do sistema (%)
Política para o sistema financeiro (FSPS)	-7.09	3.05	-1.47	15.12	-2.58
Cenário de transição energética de baixo carbono (LETS)	-44.90	0.50	0.20	-6.90	12.44
FPS e LETS combinados	-44.90	3.46	-1.4053	40.15	3.66

Os resultados do modelo demonstram que o cenário de política “suprindo a lacuna do financiamento verde” combinado com um cenário de energia de baixo carbono leva a benefícios casados de menores custos do sistema de energia, desemprego e aumentos no PIB. É importante ressaltar que os resultados mostram que focar apenas em suprir a lacuna do financiamento verde não seria suficiente para atingir emissões líquidas zero da produção de eletricidade de baixo carbono até 2050, fazendo-se necessárias políticas no próprio setor elétrico para complementar.

Conclusão

Diante desses resultados, recomendamos a implementação de um cenário de transição energética de baixo carbono em combinação com políticas destinadas a suprir a lacuna de financiamento verde com base em uma abordagem de sistemas.

Além disso, os resultados da simulação mostram que, embora não exista uma solução ganha-ganha clara, a implementação de uma política para o sistema financeiro de longo prazo, projetada de forma a suprir a lacuna de financiamento verde, traz vários benefícios, quer se introduzida de maneira isolada, quer se feita em combinação com a transição energética de baixo carbono:

- Quando a política para o sistema financeiro é introduzida isoladamente, ela reduz as taxas médias de juros do mercado e leva a um menor spread nas taxas de juros das tecnologias de energia renovável. Esses efeitos conduzem

ainda (i) a um aumento do PIB devido a taxas de juro médias mais baixas e, consequentemente, também (ii) a uma diminuição do desemprego, (iii) a um aumento do emprego direto devido a menores custos de financiamento das fontes de energia renováveis e (iv) a uma redução nos custos dos sistemas de energia devido às taxas de juros de mercado mais baixas. A única desvantagem desse cenário são as maiores emissões devido ao aumento do PIB, pois implica em maior produção e uso de energia.

- Uma política para o sistema financeiro combinada com um cenário de transição para energia de baixo carbono leva a vários benefícios casados. Ou seja, se introduzidos em combinação, o LETS e o FSPS levam a um aumento do PIB e do emprego direto ao mesmo tempo em que reduzem o desemprego e os custos do sistema de energia – e, principalmente, levam a zero emissões nos custos do sistema de energia no Reino Unido até 2050.

Os efeitos de uma política para o sistema financeiro decorrem, por um lado, de seu efeito sobre as taxas de juros mais baixas e, por outro, do suprir a lacuna do financiamento verde, o que evita subsequentemente as importações de energia do exterior. Diante disso, recomendamos a implementação de um cenário de transição energética de baixo carbono em combinação com uma política para o sistema financeiro. Os principais insights, implicações de política e conclusões aqui apresentadas mostraram-se robustos sob a análise de sensibilidade realizada.

²⁸⁷ Hafner, S. et al. (2021). Modelling the Macroeconomics of a ‘Closing the Green Finance Gap’ Scenario for an Energy Transition. Environmental Innovation and Societal Transitions, 40: 536–568.

²⁸⁸ Hafner, S. et al. (2021). Economic Impacts of Achieving a Net-Zero Emissions Target in the Power Sector. Journal of Cleaner Production, 312: 127610.

²⁸⁹ Os resultados são apresentados em termos “acumulados”, o que significa que o montante anual de cada uma das variáveis de política escolhidas é somado/ acumulado ao longo do horizonte temporal da simulação de 2016 a 2050.

²⁹⁰ No GIBM, o número de pessoas fora da força de trabalho depende da porcentagem de desemprego devido ao chamado “efeito dos trabalhadores desencorajados”. Isso incluir os indivíduos que, embora desejassem trabalhar, decidiram ficar fora da força de trabalho por desânimo e, portanto, fazem parte da força de trabalho inativa. Em nosso estudo, decidimos considerar esses indivíduos “ocultos” em nossa avaliação de políticas.

ESTUDO DE CASO:

Opções de saída para investimentos em energia renovável no Brasil

ANNA CAROLINA MARTINS (UNICAMP, BRASIL), MARCELO PEREIRA (UNICAMP, BRASIL)

Questão de política: Como a análise de “opções de saída” pode apoiar o financiamento privado de projetos de energias renováveis?

Região: Brasil

Método: Modelagem financeira

Principais resultados: A incerteza na avaliação financeira de projetos individuais de energia renovável é um fator-chave para a aplicação de opções de saída pelos credores e, apesar de ser relativamente desconhecido no país, esse método de avaliação de projetos é relevante para impulsionar o setor de renováveis brasileiro.

Engajamento: Este trabalho foi apresentado e discutido em uma série de reuniões e atividades de engajamento entre 2021 e 2022 com representantes do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), da Comissão Econômica da ONU para América e Caribe (CEPAL) e da Agência Brasileira de Pesquisa Energética (EPE). O trabalho está em andamento e mais atividades de engajamento estão sendo planejadas.

Resumo: Os autores usam uma abordagem de modelagem financeira para investigar a viabilidade e os impactos da adoção de uma abordagem alternativa – opções de saída – para avaliar o financiamento privado a projetos de energias renováveis. A modelagem adotada sugere que essa abordagem tem potencial e que deve ser realizada uma exploração detalhada de sua implementação e adoção.

Introdução

Apesar do consenso em torno da necessidade de uma transição energética rápida, os níveis atuais de financiamento privado para energia verde ainda são insuficientes^{291 292 293} e, considerando os enormes investimentos necessários, é improvável que os investimentos públicos sozinhos atinjam os níveis necessários.²⁹⁴ No Brasil, a situação não é diferente. Bancos públicos como o BNDES e o Banco do Brasil (BB) são os maiores financiadores de energia renovável,^{295 296} e outra parte substancial dos investimentos é feita por bancos internacionais de desenvolvimento, como o Banco Europeu de Investimentos (BEI) e a Agence Française de Développement (ADF). Já os investimentos do setor privado ocorrem em proporções menores e, segundo a CEPAL (2020),²⁹⁷ dependem de políticas e incentivos públicos. Assim, avaliar alternativas para estimular o setor privado a aumentar o apoio financeiro a projetos de energia renovável é parte importante da agenda da transição verde.

Financiamento de energia verde

Historicamente, o investimento em infraestrutura no Brasil tem contado principalmente com fontes públicas de capital (EPGE, 2023).^{298 299} Mesmo que não haja números precisos disponíveis, evidências anedóticas indicam que o papel dos credores privados no financiamento de energia renovável é principalmente o de um mediador de programas de instituições públicas, como a modalidade de “apoio indireto” do Finam ou Fundo Clima do BNDES,³⁰⁰ ou os instrumentos de garantia de crédito Garantia e FGI do BNDES.³⁰¹ No entanto, tais modalidades e instrumentos adotam uma abordagem de avaliação financeira tradicional de projetos, onde o credor (direto ou indireto) exige garantias financeiras para

todo o projeto, sem considerar efetivamente o “valor agregado” de uma opção de saída antecipada. Isso é particularmente crítico para projetos de longo prazo, como os de geração de energia, onde é significativa a incerteza sobre preços de energia e custos de geração, propensos à volatilidade substancial ao longo do tempo.

A aversão ao risco de entidades públicas como o BNDES, que exigem garantias de crédito substanciais de projetos candidatos, pode ser justificada pelo marco regulatório brasileiro. Porém, tais restrições podem não se aplicar a credores privados quando fornecem seus próprios fundos. Entender sob quais condições o financiamento privado (real) de energia renovável pode mudar seu comportamento atual e aumentar seu apoio à transição verde parece ser uma questão fundamental para analistas de políticas e tomadores de decisão. Apoiar um marco regulatório que viabilize novos agentes e modelos de financiamento é crucial para uma transição verde bem-sucedida, principalmente em países em desenvolvimento como o Brasil, onde o crédito para investimentos tem sido historicamente escasso e caro.³⁰²

Um grande gargalo no financiamento privado de energia verde é a escassez de investimentos em energia renovável (ER) ajustados ao risco.³⁰³ A prática mais comum de avaliação de projetos é baseada no fluxo de caixa descontado de um projeto, também conhecido como valor presente líquido (VPL), e considera os fundos necessários para CapEx e OpEx. No entanto, esse tipo de avaliação e financiamento de projetos não considera que as partes envolvidas possam mudar suas estratégias de investimento à medida que o projeto se desenvolve. Isso significa que, uma vez acordado em contrato, eles devem manter seus recursos dedicados ao projeto.

²⁹¹ IEA. (2017). Perspectives for the Energy Transition: Investment needs for a low-carbon energy system.

²⁹² Wüstenhagen, R.A.E.M. (2012). Strategic Choices for Renewable Energy Investment: Conceptual framework and opportunities for further research. Energy Policy.

²⁹³ Bloomberg New Energy Finance. (2010). Global Trends in Sustainable Energy Investment 2010: Analysis of Trends and Issues in the Financing.

²⁹⁴ Fadly, D. (2019). Low-carbon transition: Private sector investment in renewable energy projects in developing countries. World Development, 122, 552-569.

²⁹⁵ BNDES. (2022). Fundo Clima – Subprograma Energias Renováveis. Available at <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/fundo-clima-energias-renovaveis>>. Accessed on December 20, 2022.

²⁹⁶ Banco do Brasil – BB (2022). Estimulo à Energia Renovável. Available at <https://www.bb.com.br/pbb/pagina-inicial/sobre-nos/sustentabilidade/energias-renovaveis/solucoes-para-voce#>. Accessed on December 20, 2022.

²⁹⁷ CEPAL, Energia. (2022). Available at <<https://www.cepal.org/pt-br/subtopicos/energia#>>. Accessed on December 20 2022.

²⁹⁸ EPGE. (1999). Investimentos, Fontes de Financiamento e Evolução do Setor de Infra-Estrutura no Brasil: 1950-1996, Available at <<https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/575/1199.pdf>>, Accessed on January 12, 2023.

²⁹⁹ Albanez, T. and Ribeiro do Valle, M. (2012). High Interest Rates, Capital Sources and Capital Structure: The Debt Of Brazilian Companies In The Period 1997-2006, Available at <<https://www.revistas.usp.br/rco/article/download/52667/56551>>. Accessed on January 12, 2023.

³⁰⁰ BNDES Finem. Geração de Energia. Available at <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-energia>>. Accessed on January 12, 2023.

³⁰¹ BNDES, Guia do Financiamento. Available at <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia>>. Accessed on January 12, 2023.

³⁰² BNDES, Guia do Financiamento. Available at <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia>>. Accessed on January 12, 2023.

³⁰³ Nelson, D. and Pierpont, B. (2013). The Challenge of Institutional Investment in Renewable Energy. Climate Policy Initiative, San Francisco.

Dado que os projetos de energia verde podem exigir grandes volumes de recursos financeiros e por longos períodos de tempo, tal rigidez pode facilmente desencorajar o investimento do setor privado,³⁰⁴ em particular devido à significativa incerteza sobre algumas premissas-chave exigidas pelo cálculo do VPL. Pode-se facilmente demonstrar que os preços da energia apresentam significativa volatilidade no longo prazo e, por sua vez, também as receitas esperadas do projeto. Mesmo do lado do custo, a volatilidade de fatores essenciais, como salários, preços de equipamentos (importados) e taxas de câmbio, tem sido historicamente alta, principalmente nos países em desenvolvimento. Somando-se toda essa incerteza, os credores exigem altas taxas (internas) de retorno para os projetos a serem financiados, descartando no processo muitos projetos que se mostrariam perfeitamente viáveis *ex-post*.

Análise de opções reais

Para resolver esse problema, a análise de Opções Reais (OR) tem sido cada vez mais usada na avaliação de projetos de energia renovável em lugares como Califórnia, Noruega e Turquia (consulte a Tabela 15) e há muito tempo é usada em estudos de viabilidade financeira para projetos de geração de energia na China.³⁰⁵ Ao contrário das opções financeiras usuais, onde os ativos subjacentes são ativos líquidos (facilmente negociados), as opções reais são aplicadas a ativos reais, como projetos de investimento. A ideia central é que as partes envolvidas (isto é, credor e incorporador) possam mudar suas decisões sobre o financiamento e o desenvolvimento de um projeto após seu início, sem incorrer em quebra de contrato ou litígio.

Existem tipos distintos de Opções Reais. Gazheli (2018)³⁰⁶ destaca três:

- **Adiamento:** Opção de aguardar para investir no projeto. Assim, o investimento irreversível pode acontecer apenas quando mais informações sobre o mercado futuro e as condições de produção estiverem disponíveis.
- **Alteração:** Flexibilidade para alterar o projeto, através da possibilidade de modificar a forma de produção, dadas as condições futuras de mercado e produção.
- **Saída:** Oportunidade de sair do projeto antes do prazo previsto e retomar qualquer valor residual.

Ao receber pedidos de financiamento, e quando o ambiente econômico ou o contexto futuro é incerto, o credor pode desejar esperar um pouco para decidir se deve ou não investir em um determinado projeto de energia renovável. Nesses casos, a opção de adiamento oferece a chance de participar desses projetos em algum momento no futuro. A opção de alteração, por outro lado, permitiria que os agentes mudassem para tecnologias ou modelos de negócios que se mostrassem melhores ao longo do tempo. Ou, se um projeto oferece diferentes ramificações como eólica, solar ou hídrica, o agente investidor pode adquirir o direito de alternar entre as tecnologias de acordo com a viabilidade do mercado.

A opção de saída, foco deste trabalho, confere a ambos os agentes (credor e incorporador) o direito, mas não a obrigação, de abandonar o empreendimento antes do prazo fixado. Ou seja, se por algum motivo o desempenho financeiro do projeto for afetado negativamente, tanto o credor quanto o incorporador podem (dentro de um prazo acordado) optar por sair da operação de crédito, abrindo oportunidade para mudanças nas decisões de investimento.³⁰⁷ Nesses casos, o credor poderá se abster da obrigação de financiar outras etapas previamente estabelecidas no contrato, conforme detalhado a seguir, devendo ambos os agentes acordarem o(s) período(s) em que poderão rescindir. Além disso, a opção de saída não exime o incorporador de pagar o valor já emprestado.

Portanto, a opção de saída fornece um instrumento alternativo para reduzir o risco assumido pelo credor, e o aumento do VPL do projeto devido a essa redução é de fato uma valorização dessa opção. Simplificando, se a avaliação tradicional (ou seja, sem opção de saída) for $NPV1 = X$, então a avaliação considerando o valor da opção de saída é $NPV2 = X + Y$. O valor da opção é, portanto, $NPV2 - NPV1 = X + Y - X = Y$. Consequentemente, projetos que não são viáveis sob o critério usual (isto é, têm VPL negativo), mas apresentam uma opção de saída de valor positivo, podem se tornar viáveis.

Opções de saída para investimentos em energia verde no Brasil

Agora, focamos no potencial de aplicação de opções de saída para projetos de energia renovável em países em desenvolvimento como o Brasil. A abordagem OR tem sido aplicada em projetos de energia eólica,

solar e hidrelétrica em vários países (ver Tabela 15). No entanto, não temos informações sobre sua aplicação no Brasil, provavelmente devido à ausência desse tipo de instrumento nos modelos de crédito padrão propostos pelo BNDES, de longe a maior fonte primária de financiamento de investimentos em energia renovável [ibid.]. De qualquer forma e considerando o aumento da incerteza em um país em desenvolvimento, explorar mais essa alternativa pode permitir o financiamento de um conjunto de projetos que de outra forma não seriam viáveis.

Existem diferentes métodos para estimar o valor de uma opção, conforme exemplificado na Tabela 15. Aqui, aplicamos a estrutura de análise de OR proposta em Kim³⁰⁸ e discutimos brevemente o potencial de opções de saída para impulsionar o financiamento de energia elétrica renovável (EER). Nosso foco é o Brasil, onde entre 2012 e 2021 quase 7.000 projetos de infraestrutura com financiamento público, incluindo projetos de energia renovável, foram suspensos (ou seja, iniciados, mas interrompidos por algum motivo, como financiamento insuficiente ou mudanças nos resultados esperados) com um valor total do contrato de R\$ 9,32 bilhões. Isso destaca a necessidade de rever a forma como os projetos são avaliados e aprovados.³⁰⁹

Nossa contribuição é propor um modelo simples para avaliar projetos considerando variáveis críticas que podem refletir amplamente a volatilidade econômica do VPL de um projeto de infraestrutura. Focamos em duas variáveis – salários e produtividade do trabalho – incorporando assim no modelo de avaliação a volatilidade decorrente do mercado de trabalho. A ideia é que maior produtividade da mão de obra pode reduzir os custos e tornar o VPL do projeto (mais) positivo, mas se os salários crescerem mais rápido do que a produtividade da mão de obra, acontece o inverso. Usamos salários e produtividade do trabalho para exemplificar fontes típicas de volatilidade do projeto e, a partir daí, definimos o “custo” implícito dessa volatilidade por meio de um valor de opção de saída. Para completar, também consideramos duas variáveis adicionais, tarifas de serviço (energia) e utilização de capital (demanda de serviço/energia) em nosso modelo.

Procedemos em três passos:

1. Definir três cenários de futuro (melhor, pior, moderado) para as quatro variáveis a serem testadas;

2. Aplicar um modelo de árvore binomial,^{310 311} que estima a probabilidade esperada (q) de um projeto se tornar mais lucrativo, e calcular o valor da opção de saída única do modelo;
3. Combinar o VPL esperado com o valor da opção de saída para obter uma avaliação de projeto mais realista.

Em uma demonstração do conceito, aplicamos o modelo de avaliação proposto para fornecer uma noção da magnitude dos efeitos em um projeto real de energia renovável. Em trabalhos futuros iremos explorá-lo melhor, integrando o modelo como uma regra comportamental a ser (potencialmente) adotada por credores e desenvolvedores em um modelo baseado em agentes, como o modelo *Dystopian Schumpeter Meeting Keynes* (DSK) de Lamperti et al.³¹² e apresentado no estudo de caso [Opções de políticas para descarbonização rápida e suave e o crescimento sustentável](#). Isso vai nos permitir estudar como, em uma configuração de financiamento de energias renováveis macrointegrada em um modelo de avaliação fundamentado na complexidade, as ORs podem afetar a transição energética ao longo do tempo.

Simulação e resultados preliminares

A título de demonstração, consideramos a usina hidrelétrica de Itumbiara, parte do Sistema Furnas.³¹³ O investimento total do projeto (construção) foi de US\$ 187,5 milhões. É importante ressaltar que os primeiros sete anos do projeto foram dedicados à construção e os 40 anos restantes à operação (período da concessão). Assim, calculamos o valor da opção de saída no sétimo ano. Na prática, isso dá ao titular da opção, o credor do projeto, o direito de sair do projeto ao final da primeira etapa (construção) do projeto, no sétimo ano.

Com base em uma série de parâmetros técnicos e de mercado relevantes para o projeto Itumbiara, construímos os cenários de melhor, moderado e pior caso, assumindo trajetórias de evolução máxima e mínima historicamente consistentes para as quatro variáveis consideradas: salários, produtividade do trabalho, tarifa de energia e energia demanda. A árvore binomial correspondente é apresentada na Figura 86.

³⁰⁴ DWIH São Paulo. (2022). 10th German-Brazilian Innovation and Sustainability Congress. Available at < <https://www.dwih-saopaulo.org/en/event/10th-german-brazilian-innovation-and-sustainability-congress/> > Accessed on September 29 and 30, 2022.

³⁰⁵ Kim, K. H. P. A. H. K. (2017). Real Options Analysis for Renewable Energy Investment Decisions in Developing Countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

³⁰⁶ Gazheli, A. A. J. V. D. B. (2018). Real Options Analysis of Investment In Solar Vs. Wind Energy: Diversification strategies under uncertain prices and costs. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

³⁰⁷ Kim, K. H. P. A. H. K. (2017). Real Options Analysis for Renewable Energy Investment Decisions in Developing Countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

³⁰⁸ Kim, K. H. P. A. H. K. (2017). Real Options Analysis for Renewable Energy Investment Decisions in Developing Countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

³⁰⁹ Confederação Nacional dos Municípios-CNM (2022). Estudo técnico- Obras Paradas. Disponível em <<https://www.cnm.org.br/biblioteca/exibe/15354>>. Acesso em 2022.

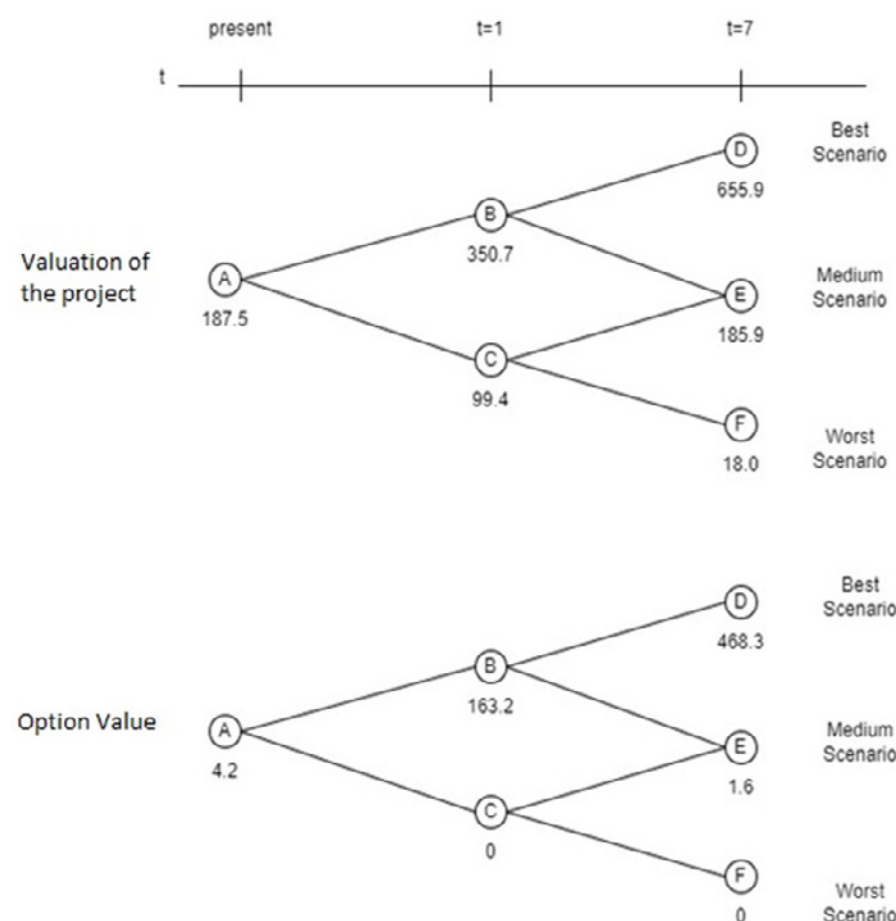
³¹⁰ A avaliação da opção de saída pode ser calculada usando diferentes métodos: árvore binomial, equações diferenciais parciais, simulação; programação dinâmica, análise empírica, abordagem dos mínimos quadrados de Monte Carlo, teoria dos jogos ou modelo probabilístico (Extensão da tabela em Kim, 2014).

³¹¹ Kim, K. H. P. A. H. K. (2014). Evaluation of R&D Investments in Wind Power in Korea Using Real Option. Renewable and Sustainable Energy Reviews 40: 335-347.

³¹² Lamperti, F. et al. (2018). Faraway, So Close: Coupled Climate and Economic Dynamics in an Agent-Based Integrated Assessment Model. Ecological Economics 150: 315-339.

³¹³ Sistemas hidrelétricos brasileiros com instalações nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Paraná, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Pará, Tocantins, Rondônia, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Ceará, Bahia e Distrito Federal.

Figura 86: Estruturas de avaliação de projetos e opções (em US\$ milhões). Observação: Os nós D, E, F representam o valor do projeto e o valor da opção em $t=7$ nos diferentes cenários. O nó A em ambas as árvores são os valores trazidos em $t=0$. Ou seja, no momento. O nó A na árvore Valor da Opção é o valor que deve ser considerado no momento da avaliação do projeto.



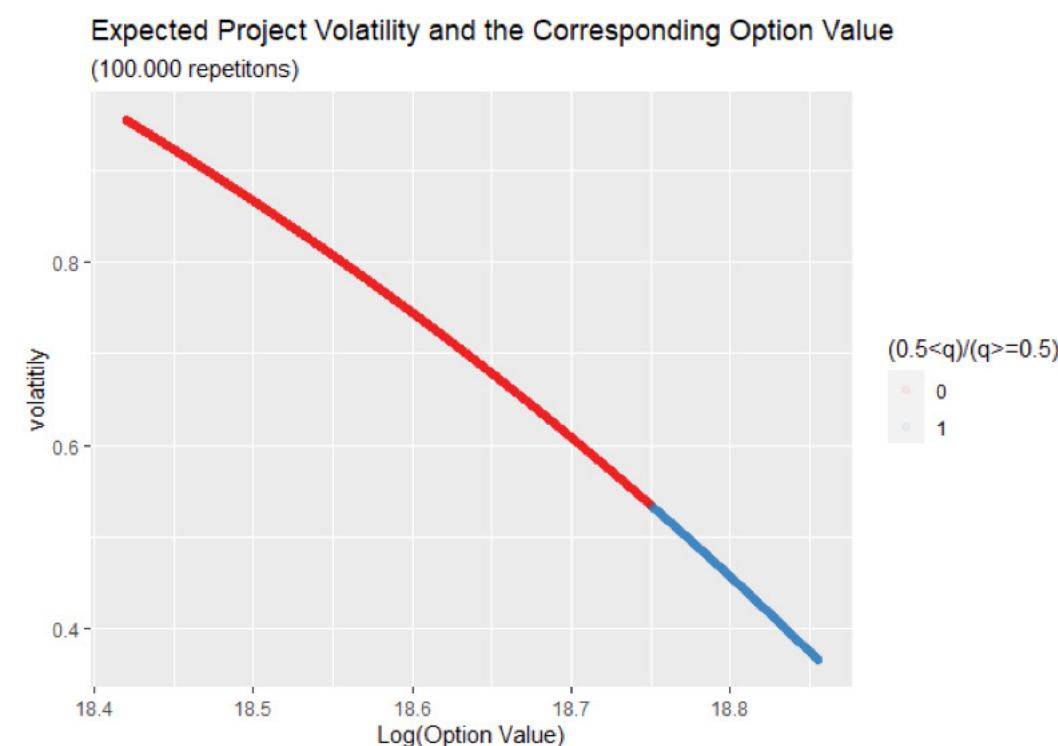
Conforme mostrado na Figura 86, o agente credor, se considerar esse mecanismo, “adquire” o direito de sair do projeto ao final da etapa de construção (após sete anos), aumentando o VPL do cenário moderado tradicional em US\$ 4,2 milhões. Portanto, o credor não seria mais obrigado a financiar a próxima etapa do projeto (OpEx) se a opção fosse exercida, preservando os plenos direitos de receber de volta os empréstimos pendentes (CapEx). Como o VPL sem o valor da opção para este projeto foi calculado em aproximadamente US\$ 3,7 milhões, o valor da opção consiste em 53% do novo valor presente. Essa diferença significativa implica que projetos similares com um VPL ligeiramente inferior podem ter sido recusados, enquanto a consideração da opção de saída os teria provado como dignos de crédito como o caso de Itumbiara.

Começando com o projeto Itumbiara, simulamos outros 100.000 projetos potencialmente viáveis semelhantes³¹⁴ para investigar como o valor da

opção de saída se relaciona com a volatilidade das variáveis do projeto. Em nosso modelo, a diferença entre o pior e o melhor cenário é dada por diferentes hipóteses para salários, tarifa de energia, utilização de capital e produtividade do trabalho, com base na volatilidade histórica. Vale ressaltar que essas variáveis são fundamentalmente impulsionadas pelos respectivos mercados, mas como elas afetam o desempenho do projeto também depende das habilidades do incorporador, sendo essa outro tipo de incerteza que procuramos lidar no modelo. Portanto, o valor da opção de saída refletirá a incerteza específica do mercado e do projeto.

Para o conjunto de projetos simulados, a Figura 87 mostra a volatilidade total do projeto modelado, o valor da opção de saída correspondente e a probabilidade q de que o projeto se torne mais lucrativo. Projetos com q menor que 0,5 são mostrados em vermelho, e aqueles com q maior ou igual a 0,5, em azul.

Figura 87: Volatilidade esperada do projeto e valor da opção correspondente com $\frac{I}{I_{ex}} = 7$ (US\$ milhões/100 milhões de repetições). Fonte: Elaborado pelo autor.

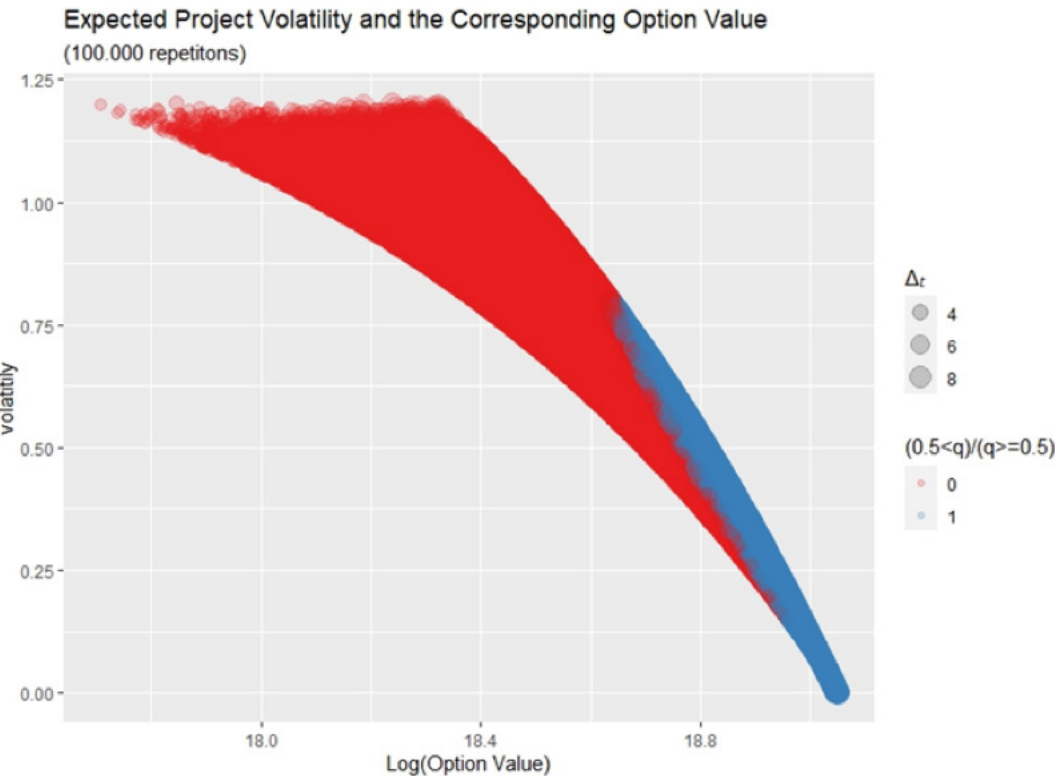


No geral, descobrimos que quanto maior a volatilidade do projeto menor o valor da opção de saída. Em níveis mais baixos de volatilidade, a parcela de projetos com maior probabilidade de se tornarem mais rentáveis é maior – e, entre os projetos com volatilidade muito baixa, todos têm mais chances de valorizar do que desvalorizar (aqueles em azul). São projetos de baixo risco e, como tal, têm o maior valor de opção de saída. Por sua vez, maior volatilidade implica em menor probabilidade de valorização do valor do projeto e menor valor da opção, o que pode ser interpretado como o prêmio de risco incorrido ao financiar o projeto.

Na Figura 88 apresentamos mais um exercício, permitindo alguma flexibilidade no momento em que a opção de saída pode ser exercida () em cada projeto simulado, do segundo ao nono ano. Nesse caso, podemos ver que existem projetos com a mesma volatilidade, mas diferentes valores de opção, e isso porque a probabilidade de uma trajetória indesejável do VPL para alguns é maior do que para outros. Nesse caso, adicionar a opção de saída à operação financeira permitiria que os credores saíssem do projeto sem incorrer em custos não planejados (por exemplo, litígios), pois mais informações sobre o desempenho do projeto são obtidas ao longo do tempo, permitindo assim um aumento do “apetite” pelo risco.

³¹⁴ Focamos nossa análise em projetos financeiramente viáveis – ou seja, aqueles com valor presente líquido positivo.

Figura 88: Volatilidade esperada do projeto e valor da opção correspondente, l_{ex} variando entre 2 e 9 (US\$ milhões/100M repetições).
Fonte: Elaborado pelo autor.



Por fim, dentro dos intervalos de nossas simulações, a maioria dos projetos tem probabilidade menor que 0,5 (áreas em vermelho) de se tornar mais rentável, sugerindo que usinas como a hidrelétrica de Itumbiara, *ex-ante*, têm menor probabilidade de serem economicamente viáveis, mesmo que o principal driver para essa avaliação esteja exclusivamente ligado à volatilidade histórica embutida nas principais variáveis. Em muitos casos, projetos perfeitamente viáveis, *ex-post*, são descartados por causa das restrições da metodologia de avaliação em lidar com a incerteza associada a projetos de longo prazo.

Conclusão

Esses resultados experimentais parecem consistentes com os baixos níveis de investimento privado no setor de infraestrutura no Brasil e em muitos países em desenvolvimento. A maior volatilidade dos mercados domésticos dessas economias, além da capacidade limitada dos métodos de avaliação usuais – desenvolvidos para países avançados – para lidar com esse nível de incerteza, parecem indicar que novas abordagens são necessárias se o envolvimento de financiamento privado for desejado.

Vale ressaltar que a simulação acima foi baseada em uma usina hidrelétrica. Portanto, realizar exercícios semelhantes para projetos de energia eólica e solar seria um próximo passo importante para entender melhor o potencial de opções de saída para fortalecer o financiamento privado para energia verde no Brasil. Além do potencial dessa abordagem de avaliação, entender melhor os motivos da menor adoção de RO no Brasil, bem como as mudanças regulatórias que podem ser necessárias para torná-lo mais viável aos agentes financiadores, é o direcionamento natural de nossas pesquisas futuras.

Tabela 15: Aplicações de Opções Reais com diferentes métodos de avaliação.

Legenda: EDP = equações diferenciais parciais; AB = árvore binomial; SIM = simulação; PD = programação dinâmica; AE = análise empírica; AMMQ = abordagem dos mínimos quadrados de Monte Carlo; GT = teoria dos jogos; MP = modelo probabilístico
Fonte: Extensão da tabela em Kim (2017).³¹⁵

Autores	País	Tipo de ER	Metodologia
HOFF (2003)	Califórnia	Fotovoltaica	AB
ZHANG X (2005)	Não regional	Hidráulica	SIM
KJAERLAND (2007)	Noruega	Hidráulica	EDP
KUMBAROĞLU (2008)	Turquia	Vento	EDP
LEE (2010)	Taiwan	Vento	AB
YANG (2010)	China	Vento	SIM
BATISTA (2011)	Brasil	Hidráulica	SIM
LEE (2011)	Taiwan	Vento	AE
ZAVODOV (2012)	China	Hidráulica	AE
REUTER (2012)	Inglaterra	Vento	EDP
BOOMSMA (2012)	R. nórdico	Vento	AMMQ
LEE (2013)	Indonésia	Hidráulica	GT + SIM
CESEÑA (2013)	Reino Unido	Fotovoltaica	SIM
KRONIGER (2014)	Inglaterra	Vento	EDP + SIM
KIM (2014)	Coréia	Vento	AB
ABADIE (2014)	Reino Unido	Vento	EDP
WEIBEL (2015)	Inglaterra	Vento (onshoree offshore)	AMMQ
JEON (2015)	Coréia	Fotovoltaica	MP
ZHANG (2016)	China	Fotovoltaica	EDP
KIM (2017)	Coréia	Hidráulica	EDP
AGATON (2018)	Filipinas	emergência	EDP + AMMQ
GAZHELI, (2018)	Não regional	Solar e Eólica	EDP

³¹⁰ Kim, K. H. P. A. H. K. (2017). Real Options Analysis for Renewable Energy Investment Decisions in Developing Countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Conclusão

Este relatório representa um grande esforço para demonstrar o valor de uma série de novos modelos econômicos sobre tópicos e questões políticas específicas, realizado em parceria com *stakeholders* em países-chave para a transição energética global. O documento traz uma visão geral dos tipos de abordagens descritos como “nova modelagem econômica”, além de discutir como se encaixam em diferentes tipos de questões políticas e como começar a usá-los.

São apresentados 15 estudos de caso envolvendo a aplicação dessas abordagens a casos reais de políticas, produzindo insights valiosos para tomadores de decisão reais. Dessa forma, acreditamos que este relatório cumpre a promessa de uma nova modelagem econômica, superando as ideias abstratas e as críticas das abordagens existentes e contribuindo para o avanço da análise de políticas energéticas e climáticas.



Resumo dos principais achados dos estudos de caso

A partir dos estudos de caso, surge um conjunto de achados importantes sobre os quatro tipos de questões de política em que nos concentramos. A Tabela 16 os resume.

Tabela 16: Questões políticas abordadas e principais conclusões deste relatório.

Questões de política	Principais resultados
Direção do desenvolvimento: Devemos descarbonizar? Quanto isso vai custar? Quais serão os impactos macroeconômicos?	• Vários estudos de caso, para diferentes países e usando métodos variados, concluíram que a descarbonização provavelmente promoverá a criação de empregos e, dependendo das estruturas econômicas das regiões de interesse, pode levar ao crescimento econômico de forma mais ampla. • É preferível uma transição energética mais rápida à atualmente prevista. • Pode haver impactos ou custos negativos em determinados cenários de transição e podemos identificar os períodos, os setores ou as ocupações em que eles podem ocorrer, bem como sua relação com outros objetivos de desenvolvimento.
Escolhas tecnológicas: Em quais tecnologias devemos nos concentrar? Quais serão os impactos setoriais?	• Os formuladores de políticas devem minimizar as barreiras às tecnologias de emissão zero, cujo desempenho melhora e os custos se reduzem à medida que aumenta sua adoção. Isso inclui energia solar, eólica, eletrolisadores e baterias. Os formuladores de políticas devem moldar os mercados para acelerar a inovação e o crescimento dessas tecnologias. • Diferentes países deverão focar em diferentes tecnologias, dependendo de sua situação atual. • A transição das tecnologias de combustíveis fósseis pode ter impactos previsíveis e gerenciáveis, dependendo da natureza da transição.
Escolhas de políticas: Quais são as melhores políticas para apoiar nossos objetivos?	• Investir em tecnologias de emissão zero tende a ser mais eficaz do que colocar um preço nos combustíveis fósseis para alcançar reduções de emissões e inovação nas principais tecnologias de energia. • A regulação pode ser altamente eficaz como meio de realocar investimentos em tecnologias de emissão zero, acelerando o aperfeiçoamento e a redução de custos delas. • Cotas tecnológicas ou compras governamentais são políticas eficazes para alavancar a indústria e podem tornar outras políticas mais eficazes. • A precificação do carbono pode ser útil quando usada como parte de um pacote de políticas (mais ainda quando implementada como um imposto do que quando num esquema do tipo <i>cap-and-trade</i>). • O momento de implantação da política é fundamental, com o suporte tardio aumentando as chances de lock-in indesejado. • Políticas de apoio pode ser neutras em termos de receita ou fiscal.
Desenho da política: Como devemos formular esta política?	• Subsídios ou impostos podem ser particularmente eficazes quando são estabelecidos em um nível que torna o custo da tecnologia de emissão zero competitivo em relação aos combustíveis fósseis. • As regulações podem ser mais eficazes quando exigem a adoção de uma tecnologia de emissão zero do que quando exigem o aumento da eficiência dos combustíveis fósseis (embora o melhor seja os dois juntos). • O mercado de emissões (ETS) precisa ser desenhado de forma a evitar um freio nas reduções de emissões quando o progresso rápido superar os ajustes no fornecimento de permissões.

Temas e lições

Os estudos de caso são ricos e variados, mas existem temas e lições mais amplos que vale destacar:

1. **Primazia da análise produzida em conjunto com stakeholders e parceiros.** Um tema comum é o uso da produção colaborativa para desenvolver insights, com equipes de formuladores de políticas e técnicos em modelagem trabalhando juntos para definir as questões de política e as abordagens analíticas, interagindo em rodadas de análise e discussão. Esse modo de trabalho não é universal e não é essencial, mas é a principal maneira para produzir insights relevantes e melhorar a capacidade e as competências de desenvolvedores e usuários de modelos. Recomendamos adotar a visualização dos *insights* dos modelos produzidos em colaboração como uma opção padrão.
2. **Valor da avaliação detalhada da política.** Muitos dos estudos de caso realizam análises de políticas detalhadas ou usam tipos de modelagem capazes de entregar isso. Aqui, estamos nos referindo a modelos que possuem realismo estrutural e parâmetros suficientes para representar detalhes significativos da implementação de políticas – não se restringindo à precificação do carbono como *proxy*. O uso de modelos que não conseguem capturar detalhes das políticas, ou que simulem cenários que não incluem políticas realistas, raramente tem valor para os formuladores de políticas. A política deve aparecer no modelo, mas ser definida de forma exógena, permitindo que técnicos em modelagem e clientes das políticas usem o modelo para simular os cenários de política de forma fácil.
3. **Uma nova geração de modelos de simulação econômica do tipo *bottom-up*, estruturalmente realistas e empiricamente validados.** Quer sejam modelos baseados em agentes, modelos dinâmicos de sistema ou E3ME e suas extensões, todos os modelos de simulação apresentados neste relatório visam representar sistemas econômicos e de energia de maneiras realistas do ponto de vista estrutural, capturando relacionamentos de baixo para cima em vez de relacionamentos observados entre macrovariáveis. Essencialmente, eles mantêm um alto padrão de validação empírica – apenas

produzindo resultados nos quais podemos confiar, por causa de seu desempenho passado. Esse é um tema comum e importante e uma melhoria significativa em relação às gerações anteriores de modelos desses tipos. O que é novo é a disponibilidade do poder de computação e de dados detalhados para melhorar a qualidade, a sofisticação e a confiabilidade dos modelos.

4. **Os modelos baseados em agente são importantes, mas não são tudo.** Modelos baseados em agentes são sinônimos de economia de complexidade e, às vezes, de nova modelagem econômica. No entanto, a amplitude dos estudos de caso aqui mostra que também existem outras abordagens – abordagens de simulação e análise de dados. Isso é importante porque a nova modelagem econômica é pluralista por natureza e abrange uma variedade de abordagens de modelagem. Essa pluralidade lhe permite responder às diferentes necessidades de *stakeholders* e contextos políticos.
5. **Considerar a maturidade de diferentes abordagens de modelagem ao usá-las.** Para gerenciar as expectativas e garantir que diferentes abordagens sejam usadas de forma adequada, é crucial considerar a maturidade dos diferentes modelos. Os modelos CGE e DSGE,³¹⁶ por exemplo, são muito maduros. Eles têm sido amplamente utilizados em contextos acadêmicos e políticos e, portanto, têm normas, estruturas e instituições bem desenvolvidas para apoiar seu uso. Isso significa que muitas vezes eles podem ser usados de forma rápida e familiar, mas são mais cristalizados, sendo difícil dar um passo para trás e questionar certas suposições. Em contraste, muitas novas abordagens econômicas são menos maduras e há menos ortodoxia em torno de seu uso. Isso significa que eles podem exigir mais tempo para serem aplicados e cada aplicação pode exigir muitas decisões, o que pode não ocorrer em abordagens mais estabelecidas. Por outro lado, são mais flexíveis a cada aplicação. A única exceção é o modelo E3ME, que nos últimos 23 anos desenvolveu um suporte institucional e uma estrutura operacional que lhe permitiu ser usado de maneira semelhante às abordagens de modelagem mais estabelecidas. Isso fornece uma referência para outras abordagens econômicas novas.

O futuro da nova modelagem econômica

Este relatório documenta apenas o começo da aplicação da nova modelagem econômica para políticas climáticas e energéticas. A influência política está apenas começando a ser sentida. À medida que o valor dessas abordagens se torna mais conhecimento amplamente, que elas melhoram e os esforços para seu uso se expandem, as seguintes tendências se delineiam para os próximos cinco anos:

1. **Saber o que funciona na prática.** Tanto dentro quanto fora do Projeto EEIST, já estamos cientes que diversos governos nacionais e regionais, organizações multilaterais, atores do setor privado e financiadores estão usando ou planejam usar os tipos de modelagem que apresentamos aqui. A aplicação dessas abordagens deve se expandir significativamente nos próximos anos. Isso é importante por duas razões. Em primeiro lugar, além dos *insights* de políticas individuais, o aprendizado sobre o que funciona será vital para aperfeiçoar o uso dessas abordagens. Em segundo lugar, com isso também devem aumentar os exemplos e modelos à disposição dos formuladores de políticas para articular mais claramente os tipos de análise de políticas que desejam. Muitas vezes ouvimos as equipes de políticas reclamarem das desvantagens de diferentes tipos de modelos, mas não temos certeza de qual seria a solução. Agora eles têm uma história positiva e uma visão para explicar mais detalhadamente o que desejam.
2. **Maior disseminação do pensamento sistêmico aplicado.** À medida que os modelos são mais e mais aplicados, também se disseminam os conceitos do pensamento sistêmico subjacentes a eles. Nosso relatório anterior, Dez Princípios para Formulação de Políticas na Transição Energética,³¹⁷ delineou as implicações políticas mais amplas de novos modelos e abordagens econômicas. Isso é parte de uma estrutura conceitual mais ampla. Além disso, estão ali conceitos como ciclos de *feedback*, pontos de inflexão e desequilíbrio. À medida que as aplicações se expandem, esperamos que aumentem significativamente a sofisticação e a “alfabetização” dos formuladores de políticas na aplicação do pensamento sistêmico. Esse é um caminho excitante a trilhar.

3. Inovação metodológica e transparência.

Juntamente com a aplicação de métodos e ideias, esperamos ver um aumento na inovação de novos métodos, refletindo seu crescente sucesso e demanda por seu uso. Essas inovações são mais prováveis em torno de: (i) calibração e validação de modelos cada vez melhores; (ii) utilização de mais e melhores dados, além de novos tipos de dados; (iii) uso de técnicas de *machine learning* para construir modelos baseados em dados ainda melhores; e (iv) comunicação e visualização do desenho e dos resultados do modelo. Também é provável que haja grandes oportunidades de capacitação em diferentes instituições para produzir e usar esses tipos de modelo, bem como um impulso maior por mais transparência e clareza em torno deles, refletindo suas inclinações mais intuitivas e estruturalmente realistas. À medida que se realizem mais capacitação e treinamento envolvendo esses métodos, mais equipes de políticas devem desenvolver um olhar crítico para os modelos e entender as suposições, os desenhos e as razões por trás de certos resultados, em vez de simplesmente aceitar resultados de modelagem sem questionamento.

Este futuro da nova modelagem econômica é uma oportunidade, mas não é inevitável. Precisamos usar os insights de políticas atuais e aprender com eles, e então continuar a investir na aplicação desses métodos às políticas e decisões do mundo real. É crucial fazer mais para desenvolver capacidade e experiência nas instituições que fazem uso dessas abordagens.

³¹⁶ Modelos de Equilíbrio Geral Computável e Equilíbrio Geral Estocástico Dinâmico.

³¹⁷ <https://eeist.co.uk/eeist-reports/>

Apêndice

Exemplos de requisitos de dados para novos modelos econômicos

Este apêndice fornece um resumo dos dados coletados e usados em uma seleção dos modelos apresentados neste relatório. Isso é apresentado em uma planilha após esta breve introdução.

Este resumo foi desenvolvido em parte para fornecer aos membros do consórcio EEIST uma compreensão dos requisitos de dados associados à aplicação de uma capacidade de modelagem a um determinado contexto. Portanto, os dados são divididos conforme os principais componentes do modelo (e, portanto, os tipos de dados e os modelos que os utilizam) – cenários, produção, trabalho, energia e ODS. Os dados também são divididos em dados que constituem um “requisito mínimo” e os que são “importantes, mas não obrigatórios”. Os primeiros são necessários para que o modelo forneça resultados confiáveis; os últimos são importantes, mas podem ser substituídos por estimativas ou substituídos por dados de outros contextos.

Conforme discutido no corpo principal do relatório, os dados coletados para cada modelo fornecem medições de indicadores do mundo real, ancorando-os nos fenômenos do mundo real e no contexto dos estudos de caso específicos. A capacidade de um modelo de prever fenômenos ou prever o futuro depende muito da qualidade e quantidade de dados usados. Vale a pena notar que a qualidade dos dados utilizados em cada um dos estudos de caso varia conforme o contexto. No entanto, nenhum país ou contexto possui os melhores tipos de dados para todas as aplicações. Portanto, todos os estudos de caso são, até certo ponto, limitados pela qualidade dos dados que utilizam. Por isso, os modelos geralmente empregam abordagens estocásticas para explorar a incerteza associada a seus dados e fornecer estimativas de alcance de seus resultados. Estudos globais agregados são os mais propensos a fornecer as melhores previsões, mas são limitados porque só podem fornecer resultados em escala global.

A planilha com os requisitos de dados pode ser encontrada em <https://eeist.co.uk/eeist-reports/new-economic-models-of-energy-innovation-and-transition/>.

Qual é a Forma mais econômica de precificação do carbono? modelando o mercado de emissões e a taxação de carbono em geral e na China

Este apêndice integra a parte três do estudo de caso citado acima. O documento foi escrito por Huaiyu Wang, Jia Liu, Tianyi Wu, Zheng Kang e Zhangang Han.

A: Custo nivelado da eletricidade

O custo nivelado de eletricidade (*levelised cost of electricity* - LCOE) para cada tecnologia é usado para orientar a escolha da tecnologia quando uma nova usina será comissionada.³¹⁸ Para uma usina recém-construída, seu LCOE pode ser calculado como:

$$LCOE_i = \sum_{y=y_b}^{y_b+d} \frac{LC(y) * (\delta * IC + MC + FC)}{(1 + r)^{y-y_b}}$$

LC = A porcentagem influenciada pela taxa de aprendizado do custo total no ano y.

MC = O custo de manutenção no ano y.

FC = O custo de combustível da usina no ano y.

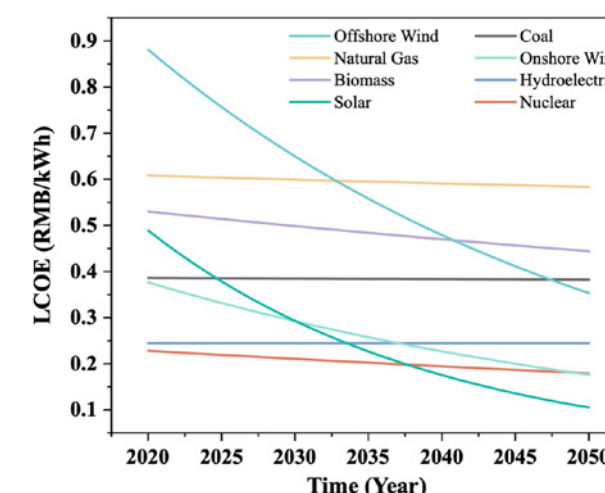
y = O ano específico em que o custo geral é estimado.

R = A taxa de desconto do capital. Assumimos que seja constante o tempo todo.

O símbolo de soma indica que o LCOE é uma variável de vida útil que funciona desde o ano de construção até o ano de desenho do projeto, assumindo que a planta não seja fechada ou desmontada. O numerador representa todos os custos em um determinado ano da vida útil e o denominador representa o fator necessário para descontar os custos desse ano até o ano de construção de acordo com a fórmula de juros compostos, sendo a taxa de desconto escolhida a taxa de retorno anualizada da CMB-GD de 2001 até hoje, que é de 1,25%. No cenário ETS, o custo futuro do carbono aqui não é um valor especificado, mas estimado (cota do ano anterior), porque uma usina não pode saber quanta cota de carbono pode obter. E o fator que identifica o ano de construção é igual a 1 no ano de construção, mas 0 em qualquer outro momento.

O LCOE final usado no modelo é ilustrado na Figura A-1. Conforme mostrado na figura, o progresso tecnológico das tecnologias convencionais – carvão, gás natural, hidrelétrica, nuclear – é muito limitado. Em contraste, assume-se um progresso significativo para energia eólica e solar.

Figura A-1 Evolução de custos de tecnologias tradicionais e inovadoras.technologies.



B: Racionalidade limitada e função de partição

O princípio da racionalidade finita no mecanismo de tomada de decisão se reflete na escolha final da fonte de energia para a nova usina. É introduzido um mecanismo de tomada de decisão estocástico semelhante à função de partição (PF) em física estatística, relacionando a probabilidade de um sistema termodinâmico estar em determinado estado com a probabilidade de escolher uma usina para uma determinada fonte de energia. Quanto maior a energia, menor a probabilidade de instabilidade em um sistema termodinâmico e, da mesma forma, quanto maior o LCOE, menor a probabilidade de se optar por construir uma usina. Nesse mecanismo, a probabilidade de escolha de uma determinada usina i P_i é dada pela seguinte equação:

$$\begin{cases} E_i = LCOE_i \\ Z = \sum_{E_i} e^{-\beta E_i} \\ P_i = \frac{e^{-\beta E_i}}{Z} \end{cases}$$

Onde β é o índice de racionalidade. Quanto maior for β, mais sensível à probabilidade é E_i e mais racional é a decisão; quanto menor for β, menos sensível à probabilidade é E_i e menos racional é a decisão. Z é o PF que funciona como parâmetro de normalização, que soma. Usando um gerador de números aleatórios uniformes para gerar números aleatórios entre 0 e 1 e a fórmula acima para calcular cada P_i, o eixo é então dividido em uma determinada ordem para cada usina de energia P_i. O intervalo em que cai o número aleatório é o intervalo em que a usina é selecionada para construção. O processo é repetido até se satisfazer a condição de que não são necessárias novas usinas, e o processo de construção de novas usinas para o ano seja concluído.

C: Regra de descomissionamento de usinas existentes

A decisão de descomissionar uma usina não é fácil, dado o enorme custo de mão de obra envolvido na construção da planta, o custo do equipamento, o custo de construção e demolição e os consideráveis empregos e fornecimento de energia que a usina pode fornecer. Claramente, não é realista ser muito sensível à lucratividade de uma usina (perdas intoleráveis e desmantelamento rápido) ou muito insensível (sempre trabalhando e operando independentemente das condições operacionais). Portanto, em nosso modelo, introduzimos uma probabilidade de desmantelamento P_{down} para simplificar esse processo de decisão. A usina deve verificar o lucro dos últimos T_{limite} anos, em que o número de anos de perda n_{deficit} dividido pelo T_{threshold} é a probabilidade de desmantelamento da usina, ou seja:

$$P_{down} = \frac{1}{T_{threshold}} * n_{deficit}$$

usando um gerador de número aleatório uniforme para gerar um número aleatório entre 0 e 1. Se for maior ou igual a P_{down}, então a planta não é desmontada e vice-versa.

³¹⁸ Branker, K. et al. (2011). A Review of Solar Photovoltaic Levelised Cost of Electricity. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15(9): 4470–4482.

D: Preço do carbono no ETS com *soft cap* e alocação gratuita

Neste cenário, usamos a fórmula empírica para calcular o preço anual do carbono, citando a referência existente:³¹⁹

$$p_{CO_2} = 10 + 40 \times \left(\frac{\sum_{j=1}^n e_j}{t} \right)$$

Onde: p_{CO_2} o preço das licenças de CO2 em Yuan/tonelada; e_j é a emissão da usina j ; n é o número de usinas de energia; t é o o limite total em tonelada/ano.

Para validar a fórmula, o preço de permissão é calculado para o ano base com 877gCO2/kWh como referência para a maioria das unidades produtoras. O resultado revela que o preço médio é de aproximadamente CNY 54,2/tCO2 (com um *soft cap* em torno de 4.280MtCO2), representando com precisão a realidade da China. Isso dá à equipe a garantia de que a fórmula, inicialmente desenvolvida para o EU ETS, é aplicável.

E: Mecanismo de leilão duplo na câmara de compensação.

O mecanismo de negociação de carbono que usamos é um leilão estatal unificado de cotas de carbono para todas as usinas termelétricas, onde o estado leiloa diretamente cotas de carbono no primeiro nível, obtém lances de leilão de cada usina para sua própria cota e, em seguida, compara-os do mais alto ao menor preço até que a cota seja emitida. O mecanismo de aprendizado para os lances do leilão da usina é baseado no algoritmo de aprendizado por reforço multi-agente de Roth-Erev,^{320 321} onde a probabilidade de escolha da próxima ação é ajustada de acordo com o benefício da ação anterior. O mecanismo de leilão flui da seguinte forma.

Leilão

1. A cada ano, o estado determina o número total de permissões com base nas metas de emissão de carbono dadas pelos investidores estrangeiros, compara-as com o número de leilões do ano e emite as licenças em lotes para compra por empresas de carvão e eletricidade

2. As empresas de carvão e eletricidade informam seus volumes de compra e dão lances de acordo com as probabilidades de licitação obtidas de seus estudos,

classificam as ofertas das empresas de carvão e eletricidade do maior para o menor valor, somam suas cotas de compra até atingirem o volume da cota emitida pelo estado, e usam o preço daquele momento como o preço da cota para o ano.

Nota: Cada fábrica movida a carvão só pode emitir CO2 na quantidade definida nas permissões adquiridas, sendo que as licenças são utilizadas apenas para gerar eletricidade, sem ter em conta que a fábrica depois vende as permissões.

Licitação e aprendizado

1. Um certo número de valores é considerado na pontuação do leilão em intervalos iguais entre o preço de reserva e o preço máximo aceitável de permissão de carbono para a usina, e cada oferta será selecionada a partir dos pontos ofertados com base na probabilidade desses pontos corresponderem aos pontos de lance aprendidos. O lance mínimo permitido é 0 e o lance máximo é desenhado, no modelo, como o ponto de equilíbrio para cada agente, o que significa que o preço do lance é igual à receita da venda de eletricidade menos o custo do combustível.

2. Este estudo adota o modelo de aprendizado por reforço Roth Erev com curva de esquecimento, com base em duas suposições básicas de vários traders no mercado:

- Escolhas bem-sucedidas e semelhantes no passado provavelmente serão usadas no futuro.
- A experiência recente será mais útil para a tomada de decisão atual do que a experiência de longo prazo.

As configurações básicas do modelo são as seguintes:

$$\begin{aligned} q_{jk}(1) &= \frac{s(1)X}{K} \\ p_{jk}(1) &= 1/K \\ r^* &= \frac{r - e}{K - 1} \\ q_{jk}(n+1) &= (1 - r)q_{jk}(n) + ME(j, k, k', n, K, e) \\ ME(j, k, k', n, K, e) &= \begin{cases} R(j, k, n)(1 - e), & k = k' \\ q_{jk}(n) \frac{e}{K - 1}, & k \neq k' \end{cases} \\ p_{jk}(n+1) &= \frac{q_{jk}(n+1)}{\sum_{m=1}^K q_{jm}(n+1)} \end{aligned}$$

Onde $q_{jk}(n)$, $p_{jk}(n)$, é a “preferência” e probabilidade do j -ésimo indivíduo escolher o k -ésimo lance no n -ésimo leilão, e é o parâmetro experimental, que reflete a velocidade de aprendizado. A preferência é o acúmulo de renda histórica (lucros gerados pela compra de cotas de carbono) no leilão de cotas de carbono, e a probabilidade é a normalização da “preferência” de todas as escolhas de licitação. Na inicialização, a “preferência” e a probabilidade de cada escolha são iguais, onde K é o número de opções de lance e X é o retorno médio inicial estimado. r é o parâmetro de recência, representando a taxa de esquecimento da “preferência” do último leilão da mesma estratégia. $ME(j, k, k', n, K, e)$ é um item de atualização de preferências. Se o leilão for bem sucedido, o lance escolherá aumentar linearmente uma “preferência” positiva de acordo com a velocidade de aprendizado e , e a proporção dos rendimentos dos lances restantes será distribuída para a “preferência” da estratégia não utilizada. A política atual e os parâmetros específicos esperados do uso desse mecanismo são os seguintes:

Configurações dos parâmetros do leilão baseado em machine-learning.

parâmetros	símbolo	valor
parâmetro de atualidade	r	0.1
parâmetro experimental	e	0.5
o número de opções de lance	K	50
retorno médio inicial estimado	X	4,000,000
parâmetro de escala	$s(1)$	1

A razão para deixar r ser 0,1 é que r é o parâmetro de recência e é razoável assumir um valor menor. e é 0,5 porque tem uma faixa de valores de 0 a 1, então o valor mediano de 0,5 foi considerado. $K=50$ foi escolhido porque, após experimentos, descobriu-se que, se K fosse pequeno, os lances seriam muito discretos, e se fosse muito grande fariam o agente aprender muito devagar. X apenas se relacionou à inicialização depois que experimentos descobriram que, devido à existência da curva de esquecimento, desde que o valor seja grande até certo ponto, o modelo é insensível ao valor de X e, finalmente, 4.000.000 é selecionado. $s(1)$ é o parâmetro de escala, $s(1)$ é definido como 1 significa que não há escala adicional.

Restrições de construção de usinas de carvão

A construção de novas usinas a carvão é permitida quando a cota é atingida? Se não for permitido, é introduzida regulamentação extra e intervenção administrativa. Embora se trate de uma política não apreciada pelos autores do presente artigo, ainda assim ela foi simulada no modelo para fornecer uma compreensão mais profunda do mecanismo de leilão no suporte à decisão.

F: Capacidade, geração de energia e distribuição de emissões de CO2 no ano base

Figura F-1 Distribuição da capacidade no ano base.

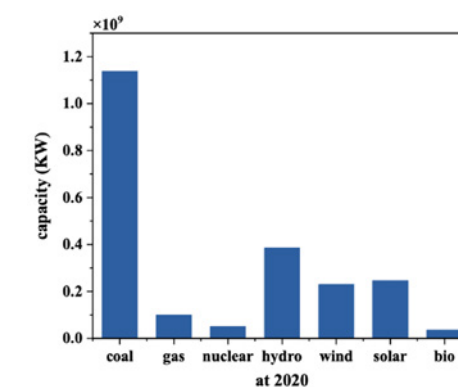


Figura F-2 Distribuição da geração de energia no ano base.

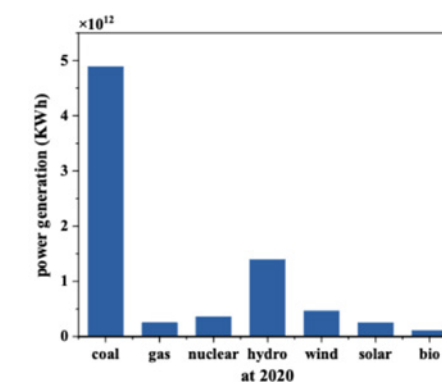
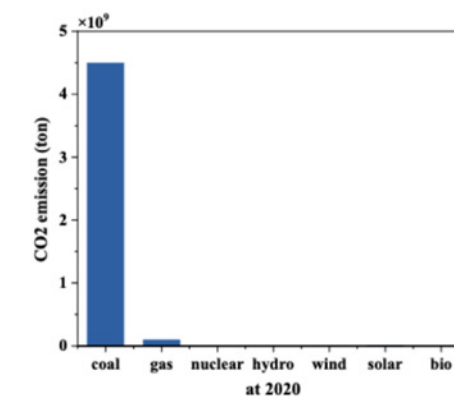


Figura F-3 Distribuição das emissões de CO2 no ano base.



³¹⁹ Chappin, E. (2011). Simulating Energy Transitions. Mother Pelican. Delft University of Technology. Retrieved from <http://www.chappin.com/thesis>.

³²⁰ Roth, A. E. and Erev I. (1995). Learning in Extensive-Form Games: Experimental data and simple dynamic models in the intermediate term. Games and Economic Behavior 8(1): 164–212.

³²¹ Nicolaisen, J. et al. (2001). Market Power And Efficiency in a Computational Electricity Market with Discriminatory Double-Auction Pricing. IEEE transactions on Evolutionary Computation, 5(5): 504–523.

EEIST

Economia da Inovação Energética e Transição do Sistema

O projeto Economia da Inovação Energética e Transição do Sistema (EEIST) desenvolve análises de inovação energética de ponta para apoiar a tomada de decisões dos governos envolvendo a inovação de baixo carbono e a mudança tecnológica. Por meio do engajamento com formuladores de políticas e *stakeholders* no Brasil, China, Índia, Reino Unido e UE, o projeto visa contribuir para o desenvolvimento econômico de nações emergentes e apoiar o desenvolvimento sustentável globalmente.

Novos modelos econômicos de inovação e transição energética. Copyright 2023. Universidade de Exeter.

Todos os direitos reservados. Os direitos autorais e de propriedade intelectual deste relatório e conteúdos associados são de propriedade da Universidade de Exeter.

Para mais informações, uso ou tradução, entre em contato com Inovação, Impacto e Negócios através do endereço IPcommercialisation@exeter.ac.uk.



Saiba mais em:
eeist.co.uk



Todos os documentos
podem ser encontrados aqui:
eeist.co.uk/downloads

