

SÍNTESE DOS RESULTADOS DE CENÁRIOS PARA A TRANSFORMAÇÃO ECOLÓGICA NO BRASIL

Prof. Emilio Lèbre La Rovere, Centro Clima/COPPE/UFRJ

11 Abril 2024

1. PREMISSAS DOS CENÁRIOS

O exercício simula dois cenários de emissões de GEE no Brasil até 2050. Ele fornece uma estrutura para analisar indicadores setoriais e de toda a economia de um caminho de descarbonização alinhado com o objetivo geral do Acordo de Paris. O Cenário de Políticas Atuais (CPS, sigla em inglês) segue a tendência das ações de mitigação em andamento. O Cenário de Descarbonização Profunda (DDS, sigla em inglês) segue uma trajetória de emissões de GEE compatível com o objetivo global de 1,5°C, alcançando emissões líquidas zero em 2050.

- **Principais facilitadores globais da descarbonização profunda da economia brasileira**

A implementação do DDS no Brasil pressupõe que o mundo está fortemente comprometido em cumprir a meta de 1,5°C do Acordo de Paris e pelo menos os países do G-20 também estão no caminho para a neutralidade de carbono até 2050 (ou 2060 para a China e um pouco mais tarde para a Índia). A oferta de financiamento internacional para investimento e inovação cresce ao longo do período, permitindo que a produtividade do trabalho nos países em desenvolvimento cresça mais rapidamente e promova educação, saúde e infraestrutura de boa qualidade. Existe um melhor acesso ao financiamento de baixo custo (em condições acessíveis) para permitir investimentos em infraestruturas de baixo carbono nos países em desenvolvimento, em consonância com a neutralidade de carbono global e fluxos de investimento robustos do Anexo I para os países não incluídos no Anexo I em mitigação e inovação. O progresso técnico continua em energias renováveis, mobilidade elétrica, eficiência energética, H₂, CCS e processos industriais altamente emissores (aço verde, cimento, etc.).

A cooperação internacional e os mecanismos de comércio apoiam a meta brasileira de desmatamento líquido zero. A adoção da precificação do carbono pela maioria dos países favorece produtos de baixo carbono no comércio e nas finanças. Os mercados voluntários de carbono ajudam o desenvolvimento de um mercado de carbono latino-americano. Há uma abertura de comércio para produtos de baixo carbono com mecanismos comerciais preferenciais que exigem rastreabilidade e comprovação de origem das exportações de produtos agrícolas e florestais que possam contribuir para o controle do desmatamento no Brasil. Os esforços de pesquisa e desenvolvimento alcançam avanços em biocombustíveis de 2ª e 3ª geração, baterias elétricas e processos industriais verdes (aço, cimento, etc.), mas no Brasil, o DDS é baseado apenas na implantação de tecnologias já disponíveis.

- **Facilitadores domésticos**

O DDS fornece uma estratégia para a retomada do desenvolvimento econômico e social, com uma transição justa para a neutralidade climática do país em 2050. O cenário considera um aumento considerável da produtividade, uma política cambial ativa e o uso das receitas de exportação de petróleo para educação, saúde e importação de bens de capital.

Baseia-se também em duas políticas climáticas:

- Redução radical do desmatamento e aumento dos sumidouros de CO₂;
- Precificação do Carbono, aplicada às emissões de GEE provenientes do uso de combustíveis fósseis e processos industriais e uso de produtos (IPPU):
 - ✓ Mercado de licenças negociáveis de emissão provenientes da utilização de energia fóssil e de processos/produtos (IPPU) para o setor industrial; e imposto sobre o carbono sobre as emissões resultantes da utilização de combustíveis fósseis noutros setores da economia;
 - ✓ A precificação do carbono é neutra do ponto de vista fiscal, com a reciclagem de 100% de suas receitas voltando para a economia; é usada para reduzir os encargos trabalhistas, criar empregos e financiar transferências sociais para as famílias mais vulneráveis, protegendo seu poder de compra;
 - ✓ Adoção em todos os setores da economia de ações de mitigação compatíveis com o preço do carbono em cada período (medidas mais baratas entram primeiro), proporcionando marcos econômicos e setoriais de um caminho de emissões de GEE para a descarbonização até 2050.

2. RESULTADOS: IMPACTOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA DESCARBONIZAÇÃO

O DDS permite alcançar a neutralidade de carbono, mantendo resultados de desenvolvimento econômico e social ligeiramente melhores do que o CPS. Ao longo do período até 2050, o PIB e o PIB per capita são ligeiramente mais elevados, a taxa de desemprego é ligeiramente inferior e o rendimento disponível médio para a classe de rendimento familiar mais pobre é ligeiramente superior ao CPS.

A política de precificação do carbono conduz a níveis de preços internos mais elevados, contribuindo para a deterioração dos termos de troca e afetando os resultados da balança comercial. A relação déficit da balança comercial/PIB é mais elevada no DDS do que no CPS, ao longo do período até 2050, embora inferior à de 2020 (mas superior à de 2015).

SÍNTESE DOS RESULTADOS: IMPACTOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA DESCARBONIZAÇÃO

As Tabelas 1 e 2 comparam os resultados macroeconômicos e sociais dos dois cenários.

Tabela 1. Principais resultados macroeconômicos dos cenários

Cenário	2015	2020	CPS (2030)	CPS (2050)	DDS (2030)	DDS (2050)
População	203	212	225	233	225	233
PIB (Bilhões 2020 USD)*	1.438	1.405	1.810	2.692	1.814	2.695
Variação do PIB em relação ao CPS	-	-	-	-	0,3%	0,1%
PIB per capita (Mil 2020 USD)	7,07	6,64	8,05	11,56	8,07	11,57
Balança Comercial (% do PIB)	-0,4%	-1,0%	-0,4%	-0,2%	-0,5%	-0,9%
Taxa de desemprego (%)	9,5%	7,6%	6,9%	7,4%	6,8%	7,2%
Índice de preços em relação ao CPS (CPS=1)	-	-	-	-	1,01	1,04
Total das emissões líquidas (Mt CO ₂ e)	1.564	1.511	1.679	1.868	957	-87
Emissões per capita (t CO ₂ e)	7,70	7,13	7,46	8,02	4,25	-0,37
Preço do carbono (2020 USD/t CO ₂ e)	-	-	-	-	19,0	49,3
Receitas de precificação de carbono (Bilhões 2020 USD)	-	-	-	-	16,0	43,0

* taxa de câmbio: 5,15 R\$/USD (2020).

Fonte: com base em La Rovere, et al. (2021) e Unterstell, La Rovere et al. (2021)

Tabela 2. Renda disponível das famílias por cenário e por classe de renda, 2015-2050

Cenário	2015	2020	CPS (2030)	CPS (2050)	DDS (2030)	DDS (2050)
Renda DisponívelHH1 (2015=1) (20% mais pobres das famílias)	1,00	1,05	1,45	2,43	1,46	2,46
Renda Disponível HH2 (2015=1) (40% dos domicílios)	1,00	1,04	1,38	2,16	1,38	2,17
Renda Disponível HH3 (2015=1) (30% dos domicílios)	1,00	1,01	1,29	1,92	1,29	1,93
Renda Disponível HH4 (2015=1) (10% mais ricos das famílias)	1,00	0,98	1,22	1,79	1,23	1,80
Renda Disponível HH1 (em relação ao CPS)	-	-	-	-	0,3%	1,15%
Renda Disponível HH2 (em relação ao CPS)	-	-	-	-	0,07%	0,35%
Renda Disponível HH3 (em relação ao CPS)	-	-	-	-	-0,01%	-0,08%
Renda Disponível HH4 (em relação ao CPS)	-	-	-	-	-0,06%	-0,28%

Fonte: com base em La Rovere, et al. (2021) e Unterstell, La Rovere et al. (2021)

A reciclagem inteligente das receitas da precificação de carbono pode ser socialmente amigável. As receitas de carbono são distribuídas de volta para a economia, mantendo a evolução da capacidade líquida de financiamento do governo idêntica nos 2 cenários, sob as seguintes regras: (i) parte das receitas de carbono é transferida de volta do governo para as famílias para neutralizar o efeito do preço do carbono sobre poder de compra; (ii) o restante das receitas de carbono é usado para reduzir os encargos trabalhistas. Este último reduz as distorções na economia e é fundamental para criar mais 150 mil empregos no DDS em comparação com o CPS. Esses empregos são criados principalmente nos setores de serviços, transporte, florestas e biocombustíveis. O preço do carbono penaliza os setores intensivos em carbono em uma proporção mais alta, e a reciclagem das receitas de carbono favorece setores mais intensivos em mão-de-obra e classes domésticas mais pobres.

Os níveis mais elevados de emprego e salário no DDS melhoram a distribuição de renda. O impacto positivo nos níveis de renda das famílias é particularmente relevante nos grupos HH1 e HH2 (60% da base), que dependem mais da renda do trabalho. O HH1 (os 20% de domicílios mais pobres, a maioria dos quais estava abaixo da linha de extrema pobreza no ano base) se beneficia ainda mais do cenário DDS devido às transferências diretas das receitas de carbono coletadas do governo.

O DDS permite a neutralização das emissões de GEE em 2050, ao mesmo tempo em que mitiga os efeitos adversos da tributação do carbono nas famílias pobres. Os ganhos de renda disponível no DDS são significativos em comparação com o CPS, graças a níveis mais altos de atividade, menores encargos trabalhistas e maiores transferências do governo, que se refletem em mais empregos e maior renda. O DDS também é progressivo na distribuição de renda ao longo do período até 2050, já que as classes de renda mais baixas apresentam maior crescimento da renda disponível do que as mais ricas e um aumento mais rápido do que no CPS.

- **Políticas e ações prioritárias de curto prazo no caminho para o zero líquido em 2050**

As prioridades para o curto prazo derivadas da análise de cenários são:

- ✓ Retomar as políticas bem-sucedidas adotadas no passado recente (2004-2012) para reduzir drasticamente as taxas anuais de desmatamento (comando e controle e instrumentos econômicos).
- ✓ Desenvolver mecanismos financeiros inteligentes para promover o financiamento de oportunidades de investimento, principalmente na restauração da cobertura florestal e infraestrutura de baixo carbono.

- ✓ Precificação do carbono: fornecer um sinal estável e de longo prazo para induzir os agentes econômicos a escolher tecnologias de baixo carbono por meio de um esquema de *cap-and-trade* bem estruturado para a indústria e uma taxa de carbono em outros setores.
- ✓ Contar com o setor AFOLU para reduzir e capturar a maior parcela de emissões na primeira metade do século para se aproximar da meta líquida zero até 2050 ajuda a reduzir os custos gerais para o Brasil e fornece tempo suficiente para que as tecnologias disruptivas sejam economicamente viáveis.

- **Resumo das principais conclusões**

- ✓ O DDS é apenas um entre muitos caminhos para o Brasil alcançar a neutralidade climática até 2050.
- ✓ Pressuposto subjacente: utilização apenas das tecnologias disponíveis; enorme potencial de mitigação a baixos custos no Brasil mesmo antes da implantação de *breakthroughs* tecnológicos.
- ✓ A redução acentuada da taxa anual de desmatamento e a restauração da vegetação nativa em áreas públicas e privadas têm um potencial de redução significativo e custos mais baixos do que as ações de mitigação em outros setores.
- ✓ Um caminho para emissões líquidas zero de GEE em 2050 pode ser alcançado com um preço de carbono de 19,0, 34,1 e 49,3 USD / t CO₂e, respectivamente, em cada década; esses níveis são bem inferiores aos já praticados em muitos países avançados, demonstrando a vantagem competitiva do Brasil na transição para uma economia de zero carbono.
- ✓ Esta via de precificação do carbono permite estabelecer metas e marcos setoriais de mitigação consistentes com uma meta de emissões líquidas zero de GEE em toda a economia em 2050, abrindo caminho para a criação de um esquema de *cap-and-trade* para o setor industrial e planos de mitigação setoriais.
- ✓ O DDS permite alcançar a neutralidade de carbono e, ao mesmo tempo, alcançar resultados de desenvolvimento econômico e social ligeiramente melhores do que o CPS (graças a uma reciclagem inteligente das receitas de precificação de carbono).

ANEXO I - QUALIFICAÇÃO DO CENTRO CLIMA/COPPE/UFRJ

O Centro de Estudos integrados sobre Meio Ambiente e Mudanças Climáticas - Centro Clima é um centro de pesquisa da COPPE/UFRJ (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro), ligado ao Programa de Planejamento Energético e Ambiental, especializado no desenvolvimento de estudos científicos e de projetos na área de Mudanças Climáticas e Meio Ambiente, o qual visa gerar e disseminar conhecimento para os agentes sociais dos setores: governamental, não governamental, privado e acadêmico; de instituições nacionais e internacionais. Foi criado no ano 2000 através de convênio celebrado com o Ministério do Meio Ambiente.

(ver informações detalhadas em www.centroclima.coppe.ufrj.br.)

Dentre as experiências recentes do Centro Clima na área de Descarbonização destacam-se:

- La Rovere, E. L. (coord.) et al, 2023; Uma estratégia de Descarbonização para uma Economia Brasileira de Zero carbono Líquido em 2050: Instrumentos de Política e Planos Setoriais de Mitigação, relatório do Projeto DECARBOOST – Viabilização de investimentos na transição para uma sociedade de baixo carbono de países latino-americanos. SSN/IKI/BMUV. Disponível em www.centroclima.coppe.ufrj.br
- Unterstell, N. & La Rovere, E. L. (coords), 2021 e 2022 (2 projetos). Clima e Desenvolvimento: Visões para o Brasil 2030. Disponível em <https://www.institutotalanoa.org/documentos>
- Quarto Inventário Brasileiro de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Setor Queima de Energia Brasil (2020). Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. CNI/DDIE/ECON/Unidade de Edição. Atualizado em 7 de março de 2022 https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/b0/6f/b06f3ef0-14f3-4497-b1d2-5716d2c95df5/industrys_importance_in_brazil_march2022.pdf
- PMR- Brasil (2019) – Partnership for Market Readiness, Banco Mundial e Ministério da Economia. Componente 2A -modelagem econômica de cenários de precificação de emissões <http://www.fazenda.gov.br/orgaos/spe/pmr-brasil>
- Emissões de GEE no Brasil até 2030 sob as atuais políticas de mitigação - cenário A e sob ações adicionais de mitigação - cenários B e C e Indicadores para o monitoramento do progresso na consecução das metas da NDC no Brasil. Projeto Centro Clima/ICAT/Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas (FBMC)/Centro Brasil no Clima (2019)
- Projeto IES-Brasil 2050 – Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE no Brasil até 2050. Centro Clima/FBMC (2017)

- Projeto IES-Brasil 2030 – Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE no Brasil até 2030. Centro Clima/FBMC (2015)
- Terceiro Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado do Rio de Janeiro (2015)
- Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Setor Energia (2014)

O Projeto IES-Brasil, coordenado pelo Centro Clima da COPPE/UFRJ, no âmbito do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC, com apoio do governo brasileiro através do MMA e do projeto internacional Mitigation Actions, Plans and Scenarios - MAPS, usou um processo participativo para elaborar cenários de mitigação das emissões de GEE do Brasil até 2030. Este projeto, realizado de 2013 a 2015, constituiu-se numa experiência bem sucedida de estabelecer um diálogo transparente e construtivo entre cerca de 70 representantes de instituições de governo, setor produtivo, ONGs e comunidade científica, reunidos na Comissão de Elaboração de Cenários – CEC. Na quantificação dos cenários, além de modelos técnico-econômicos setoriais para AFOLU, Energia, Transportes e outros setores, foi utilizado um modelo macroeconômico de equilíbrio geral, o IMACLIM-BR, especialmente desenvolvido pela equipe do Centro Clima para simular as implicações econômicas e sociais da redução de emissões de GEE do país. A CEC discutiu e validou as hipóteses mais pertinentes para serem testadas nos cenários elaborados, analisando as barreiras para adoção das medidas de mitigação propostas e instrumentos de política pública para superá-los.

O produto final do IES-Brasil, um relatório com a síntese da análise comparativa dos três cenários elaborados, mostrou a viabilidade de uma redução significativa das emissões do Brasil até 2030 sem comprometer o crescimento econômico e a qualidade de vida da população. Seus resultados foram apresentados ao MMA e outros ministérios, e à plenária do FBMC, fornecendo elementos valiosos para a preparação da NDC brasileira (a Contribuição Nacionalmente Determinada) apresentada à Convenção do Clima – UNFCCC e ratificada pelo Congresso Nacional.

Em 2016-2017, o Centro Clima desenvolveu, com apoio do Instituto Clima e Sociedade – ICS e do WWF – Brasil um estudo técnico nos mesmos moldes, estendendo o horizonte de análise até 2050 para desenvolver e analisar cenários de emissões de GEE do Brasil compatíveis com um aumento global da temperatura limitado a 1,5 °C.

Ao longo do período 2020-2022, o Centro Clima realizou, em parceria com o Instituto Talanoa e apoio do ICS, a Iniciativa Clima & Desenvolvimento, esboçando uma estratégia de desenvolvimento compatível com uma trajetória de emissões de GEE até 2030 que leve à neutralidade de emissões de GEE em 2050 (LTS – estratégia de longo prazo, compromisso com o objetivo central do Acordo de Paris). Foi seguida uma metodologia participativa, para permitir um diálogo abrangente entre cerca de 120 técnicos de governo, setor produtivo, comunidade científica, ONGs e representantes de vários segmentos da sociedade civil organizada sobre hipóteses de cenários e identificação de ações de mitigação viáveis, seus custos, obstáculos e

instrumentos para sua superação. As hipóteses e resultados do estudo foram apresentadas a um Comitê de decisores políticos de alto nível do setor produtivo e de governos subnacionais.

Neste último estudo, além dos cenários elaborados em 2021, foram também produzidos em 2022 quatro estudos de interesse especial para este trabalho de apoio técnico ao Observatório do Clima:

- Relatório sobre a Transição Energética: análise de instrumentos de política para regular o uso de petróleo, gás natural, carvão mineral, energia nuclear, energias renováveis e da eficiência energética para viabilizar as ações de mitigação.

- Relatório sobre a Transição Justa: análise de instrumentos de política para aumentar a geração de empregos, conter a inflação e melhorar a distribuição da renda, reduzindo desigualdades sociais, no Cenário de Transição Justa e Desmatamento Zero.

- Relatório sobre Proposta de Política de Precificação de carbono via mercados de cotas comercializáveis de emissões de GEE para a indústria e taxas proporcionais às emissões de GEE nos setores de transportes e de energia, com neutralidade fiscal.

- Relatório sobre política de financiamento: análise de instrumentos para implementar as ações de mitigação propostas e viabilizar o Cenário de Transição Justa e Desmatamento Zero, superando as barreiras financeiras à sua realização.

ANEXO II – METODOLOGIA DE MODELAGEM

Para simular os cenários, utilizamos uma modelagem que integra um conjunto de seis modelos setoriais a um modelo macroeconômico de equilíbrio geral (CGE) específico para o Brasil. Os modelos setoriais são: quatro modelos de demanda de energia (transportes, indústria, edificações e agricultura), um modelo para AFOLU e um modelo de oferta de energia (MATRIZ). Finalmente, um modelo de resíduos completa as estimativas.

As estimativas para a demanda de energia exigem dados semelhantes, como dados demográficos (população) e macroeconômicos (PIB, PIB setorial), bem como níveis de atividade e intensidade energética, de modo a fornecer resultados comparáveis (por exemplo, demanda final de energia em toneladas de óleo equivalente e emissões de GEE). No entanto, podem diferir amplamente em termos de especificação setorial, nível de detalhe e disponibilidade de outros dados.

O modelo 'Transport-Energy-Emissions Multi-Tier Analysis' (TEMA – Análise multinível de emissões de energia de transporte) é utilizado para calcular o uso de energia no setor de transportes brasileiro. O modelo foi desenvolvido por Gonçalves et al. (2019) e aplicado em estudos como Goes et al. (2020a; 2020b) e Gonçalves et al. (2020). Os cenários são projetados simulando a aplicação de políticas climáticas, tendências de mercado e comportamento do usuário que melhor representam as transformações da sociedade ao longo dos anos. Os dados macroeconômicos são utilizados para projetar a atividade de transporte (e a repartição modal) e a consequente utilização de energia bem como as emissões de GEE. No TEMA, o transporte rodoviário é o modo com mais alto nível de detalhe, considerando 31 tecnologias que incluem categorias de veículos (por exemplo, carros, ônibus, caminhões) e *powertrains* (por exemplo, motores de combustão interna, veículos elétricos movidos a bateria, veículos híbridos, etc.). Os setores ferroviário, aéreo, aquático e de dutos são modelados de forma mais agregada devido à falta de dados em termos de tecnologia. Nesse caso, a abordagem “Activity-Structure-Intensity-Fuel” (ASI, Atividade-Estrutura-Intensidade-Combustível) é utilizada para calcular a utilização de energia e as emissões de GEE.

A abordagem ASIF também é aplicada para estimar o consumo de energia e as emissões de GEE do setor industrial brasileiro desagregado em onze segmentos: (i) Ferro e Aço, (ii) Ferroligas, (iii) Cimento, (iv) Indústria química, (v) Metais não ferrosos, (vi) Papel e Celulose, (vii) Alimentos e Bebidas, (viii) Têxtil, (ix) Mineração e pelotização, (x) Cerâmica, e (xi) Outras Indústrias. A estimativa das emissões de GEE é dividida em duas: (i) emissões do consumo de energia e (ii) emissões de processos industriais e uso de produtos (IPPU). No geral, os processos industriais que emitem GEE são a produção de metais, cimento e outros produtos minerais e produtos químicos. As emissões de utilização do produto abrangem as emissões de HFC para refrigeração e as emissões de SF₆ de equipamentos de transporte e distribuição de eletricidade.

As emissões de GEE da demanda de energia de edifícios (residencial, comercial e administração pública) e da agricultura são estimadas considerando as tendências históricas na evolução da demanda de energia e hipóteses do CPS até 2050, de acordo com diferentes fatores. No setor residencial, a demanda de energia responde à demografia e à renda per capita. Nos setores de serviços e da agricultura é impulsionada pelo crescimento setorial do PIB. Dado que não são simuladas mudanças tecnológicas, este cálculo é suficientemente detalhado para fornecer as estimativas globais da demanda setorial de energia. Eventuais diferenças entre os cenários CPS e DDS refletem apenas pequenas mudanças na renda per capita e na participação do PIB na agricultura e nos serviços.

Além do desmatamento, a modelagem AFOLU estima os níveis de atividade futura por correlação com as taxas de crescimento do PIB. Os níveis de atividade são ajustados para atender à demanda por produtos agrícolas de outros setores (etanol, biodiesel e florestas plantadas homogêneas) e exportações, conforme definido pelo modelo CGE. Os pressupostos sobre os ganhos de produtividade são retirados da literatura pertinente e a maioria das estimativas de emissões é calculada de acordo com a metodologia do inventário nacional. Também é simulada a adoção de práticas de mitigação de baixo carbono na agricultura, conforme prescrito no Plano Nacional de Agricultura de Baixo Carbono – Plano ABC (recuperação de pastagens, fixação biológica de nitrogênio, sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta e plantio direto). A simulação da produção e da área agrícola inclui soja, milho, cana-de-açúcar e um grupo de 14 culturas (algodão, amendoim, arroz, aveia, centeio, cevada, ervilha, fava, feijão, girassol,

mamona, sorgo, trigo e triticale) e carne bovina. As taxas de desmatamento não são diretamente ligadas ao PIB, são definidas com base no julgamento de especialistas. Assim como a taxa de desmatamento, as terras a serem destinadas a unidades de conservação e as terras indígenas são determinadas de forma exógena. A área destinada à restauração de florestas nativas varia de acordo com os cenários.

Por fim, o modelo MATRIZ (CEPEL, 2020) representa o sistema energético brasileiro e detalha os setores de oferta de energia elétrica e refino de petróleo. O MATRIZ é um modelo de programação linear *bottom-up* para o planejamento de sistemas energéticos de médio a longo prazo, semelhante ao MESSAGE e ao TIMES (IEA-ETSAP, 2020; IIASA, 2020).¹ Uma função objetiva minimiza o valor presente do custo total de investimento e operação do sistema para suprir a demanda final exógena de energia com base na disponibilidade de recursos, escolhendo a melhor configuração para expansão de capacidade e oferta de energia no horizonte avaliado. As cadeias de energia são representadas pela ligação de níveis de energia primários, secundários, finais e úteis. Uma mistura de diferentes tecnologias representa conversões de energia e extrações de recursos. Quatro subsistemas operacionais respondem pela complexidade do setor elétrico brasileiro. Além disso, cada período da análise é detalhado em quatro estações, cada uma contendo dois níveis de demanda de energia: pico e fora de pico. Esse nível de especificação é essencial para a segurança energética, garantindo que o sistema atenda às demandas sazonais e horo-sazonais e à geração de energia, bem como a períodos potenciais de hidrologia crítica. O MATRIZ calcula as emissões de GEE de forma endógena. Uma penalidade é simulada na função objetivo especificamente para as tecnologias de combustíveis fósseis para representar a precificação do carbono.

Os modelos setoriais alimentam o IMACLIM-BR, um modelo de equilíbrio geral capaz de simular os efeitos macroeconômicos e sociais das políticas climáticas e da precificação de carbono no Brasil, (Wills et al., 2021; Gherzi, 2015; Hourcade et al., 2006).² É um modelo de simulação dinâmica que retrata o crescimento econômico anual resultante de pressupostos

¹ MESSAGE e TIMES são ambos modelos *bottom up* de oferta de energia que usam programação linear para produzir um sistema de energia de menor custo, otimizado de acordo com uma série de restrições do usuário, geralmente em horizontes de tempo de médio a longo prazo.

² O IMACLIM existe em uma versão multirregional global (Crassous et al., 2006; Sassi et al., 2010) e em um número crescente de versões de países (Hourcade et al., 2010; Testamentos, 2013; Schers et al., 2015; Le Treut, 2017; De Lauretis, 2017; Gupta et al., 2019, 2020; Soummane et al., 2020; Le Treut et al., 2021). Ver <http://www.centre-cired.fr/en/imacim-network/imacim-network-en/>.

sobre disponibilidade de mão de obra e produtividade do trabalho. Além dessas especificações centrais e para aumentar a relevância empírica, de forma semelhante às versões de outros países, o IMACLIM-BR se desvia do padrão CGE neoclássico por meio de quatro características principais, criando assim um modelo CGE híbrido para o Brasil³.

Em primeiro lugar, o IMACLIM-BR é calibrado com base em dados híbridos originais que conciliam as contas nacionais com o balanço energético e os preços verificados no ano base. Os dados de 2015 recentemente atualizados assumem a forma de uma Matriz de Contabilidade Social de 19 setores apoiada por contas satélites de seis fluxos de commodities energéticas consistentes com os preços documentados do mercado de energia específicos de agentes. A contabilidade híbrida tem uma influência significativa na análise macroeconômica por meio da reavaliação das participações de custo da energia nas funções de produção por meio das parcelas orçamentárias de energia para as famílias e da desagregação do consumo de energia entre setores e agentes (Combet et al., 2014; Le Treut, 2017).⁴

Em segundo lugar, o IMACLIM-BR traça caminhos de crescimento sob restrição de fluxos de energia a preços específicos do agente e requisitos de capital para oferta de energia e uso final de energia (Gherzi, 2015). Isso aloca parte do valor agregado para despesas de energia sob restrição e parte das dotações de fatores primários para volumes de oferta de energia restritos. Essas restrições de volumes, custos e preços pesam sobre o crescimento econômico.

Em terceiro lugar, o IMACLIM-BR simula um crescimento subótimo baseando-se em trajetórias de investimento exógenas em vez de otimização intertemporal e considerando mercados não energéticos imperfeitos através da subutilização de capital e trabalho. No mercado de trabalho, a inércia dos salários reais impede o pleno emprego, ou seja, simula a taxa de desemprego por meio de uma "curva salarial" (Blanchflower e Oswald, 2005). A taxa de utilização do capital é uma variável exógena que efetivamente aumenta o estoque de capital disponível. A trajetória da mobilização da capacidade ociosa é calibrada de modo a ser compatível com a

³ Por uma questão de transparência e para facilitar a expansão para novas economias, o IMACLIM, incluindo sua versão brasileira IMACLIM-BR, agora tem acesso aberto e hospedada no Github (Le Treut et al., 2019). Além disso, Le Treut (2020) apresenta as equações genéricas das versões nacionais do IMACLIM. Todas as especificações nele contidas aplicam-se ao IMACLIM-BR, salvo especificação em contrário nos parágrafos seguintes.

⁴ Os 19 setores são: carvão, petróleo e derivados excluindo diesel, gás natural, biocombustíveis, diesel, eletricidade, silvicultura, pecuária, outra agricultura, cimento, ferro e aço, metais não ferrosos, produtos químicos, laticínios e produtos à base de carne, outras indústrias alimentícias, papel e celulose, outras indústrias, transportes e outras atividades. Os setores foram agregados a partir da matriz híbrida de 40 setores publicada em Grottera et al. (2021).

reabsorção gradual do desemprego em condições de BAU (para o nosso cenário BAU, ver abaixo).

É comum a todos os cenários.

Por fim, o IMACLIM-BR se desvia ainda mais do paradigma neoclássico ao considerar o fechamento da poupança externa, ou seja, da balança comercial, para acomodar a dinâmica exógena do investimento e da poupança das famílias e o balanço orçamentário público resultante de alíquotas exógenas de impostos e dos gastos públicos (em proporção do PIB). Essa escolha de fechamento destina-se a representar a política monetária efetivamente adaptando a poupança externa para alinhar a poupança total com os requisitos de investimento (Taylor e Lysy, 1979).

O acoplamento entre os modelos *bottom-up* e o IMACLIM-BR é realizado por meio de uma troca de informações e dados chaves, de forma interativa, notadamente para atividade econômica setorial, intensidades e custos de energia, energia comercializada e custos de capital (Figura 1).

O preço do carbono aumenta linearmente dentro de cada década, e auxilia na definição de quais medidas de mitigação devem ser simuladas pelos modelos setoriais que informam o IMACLIM-BR sobre a oferta e demanda de energia e o total de investimentos necessários em mitigação. Esta troca de informações permite estimar os custos de mitigação e a demanda/oferta de energia por modelos setoriais e ser coerentes com a demanda de capital e os coeficientes de energia e tecnologia do modelo CGE. Após garantir o equilíbrio macroeconômico, além dos indicadores econômicos e sociais, o IMACLIM-BR disponibiliza novos níveis de atividade por setor, iniciando novamente o processo de iteração para calcular a demanda e oferta total de energia e o preço de equilíbrio do carbono.

Reduzir as emissões do desmatamento requer a retomada das políticas de comando e controle, já que a maioria delas resulta de atividades ilegais (Wills et al, 2021; Grottera et al., 2022).⁵

⁵ Carolina Grottera, Giovanna Ferrazzo Napolini, Emilio Lèbre La Rovere, Daniel Neves Schmitz Gonçalves, Tainan de Farias Nogueira, Otto Hebeda, Carolina Burle Schmidt Dubeux, George Vasconcelos Goes, Marcelo Melo Ramalho Moreira, Gabriela Mota da Cruz, Claudio Joaquim Martagão Gesteira, William Wills, Gabriel Malta Castro, Márcio de Almeida D'Agosto, Gaëlle Le Treut, Sergio Henrique Ferreira da Cunha, Julien Lefèvre. Implicações da política energética dos cenários de precificação de carbono para a implementação da NDC brasileira, Política Energética, Volume 160, 2022, 112664, versão impressa ISSN 0301-4215, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112664>.

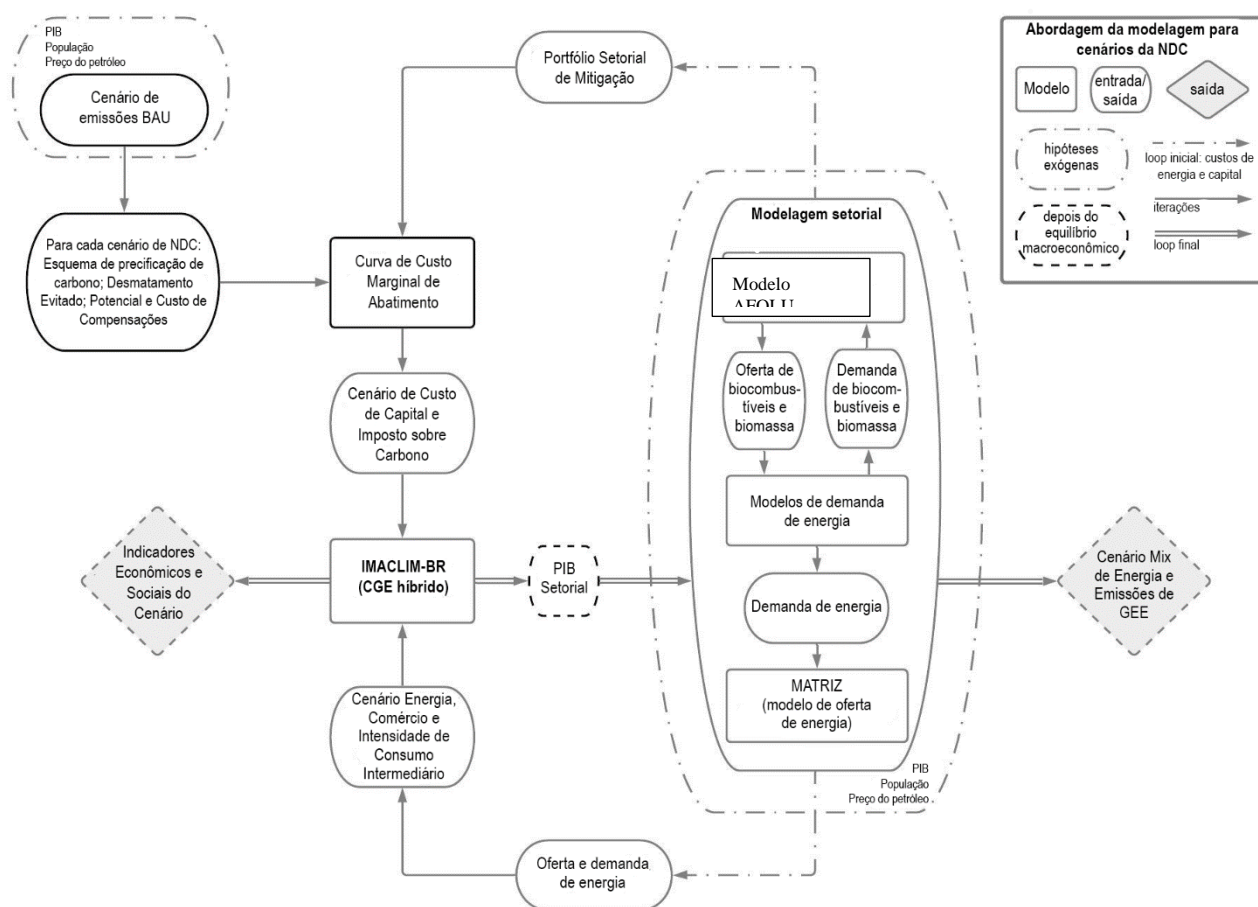


Figura 1. Diagrama de modelagem integrada para cenários do Brasil
Fonte: Adaptado de Wills et al. (2021)