



# Plano de descarbonização para o Estado de Minas Gerais dentro de um Brasil clima neutro em 2050

Relatório síntese da modelagem integrada para o Brasil

## Elaboração

Laboratório Cenergia/PPE/COPPE/UFRJ

## Coordenação

Prof. Roberto Schaeffer

Prof. Alexandre Szklo

Prof. André F. P. Lucena

Prof. Pedro R. R. Rochedo

Profª. Joana Portugal-Pereira

## Equipe

Talita Cruz

Mariana Império

Luiz Bernardo Baptista

Gerd Angelkorte

Eveline Arroyo

Trabalho facilitado pelo  
CDP Latin America



## Sobre o CDP

O CDP é uma organização global sem fins lucrativos que administra o sistema mundial de divulgação ambiental para empresas, cidades, estados e regiões. Fundado em 2000 e trabalhando com mais de 590 investidores com mais de US\$ 110 trilhões em ativos, o CDP foi pioneiro no uso de mercados de capitais e compras corporativas para motivar as empresas a divulgar seus impactos ambientais e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, gerenciar os recursos hídricos e proteger as florestas. Mais de 14.000 organizações em todo o mundo divulgaram dados por meio do CDP em 2021, incluindo mais de 13.000 empresas que valem mais de 64% da capitalização de mercado global e mais de 1.200 cidades, estados e regiões. O CDP é membro fundador da iniciativa Science Based Targets, We Mean Business Coalition, The Investor Agenda e da iniciativa Net Zero Asset Managers. Visite [la-pt.cdp.net](http://la-pt.cdp.net) ou siga-nos [@CDPLatinAmerica](https://twitter.com/CDPLatinAmerica) para saber mais.

Sugestão de citação:

CRUZ, T.; IMPÉRIO, M.; BAPTISTA, L.B.; ARROYO, E.; ANGELKORTE, G.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A.; LUCENA, A. F. P.; ROCHEDO, R. R. P.; PORTUGAL-PEREIRA, J. Plano de descarbonização para o Estado de Minas Gerais dentro de um Brasil clima neutro em 2050: Relatório síntese da modelagem integrada para o Brasil. São Paulo: CDP Latin America, 2022, p. 1-45.

# Sumário

<b>Introdução</b> .....	5
<b>Contextualização</b> .....	7
Por que tratar Brasil e Sudeste antes de Minas Gerais?.....	7
Premissas econômicas e cenários desenvolvidos.....	8
<b>Resultados da modelagem integrada</b> .....	13
Contexto de longo prazo.....	13
Setor de energia.....	15
Setor elétrico.....	16
Setor de óleo e gás natural.....	18
Setor de biocombustíveis.....	19
Setor industrial.....	21
Setor de transportes.....	22
Setor de Agropecuária, Florestas e Outros Usos do Solo (AFOLU).....	23
Setor de resíduos.....	25
<b>Onde vamos chegar? A trajetória de emissões de GEE</b> .....	26
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	29
<b>Anexos</b>	
<b>Anexo A – Glossário</b> .....	31
<b>Anexo B – Estrutura da Modelagem Integrada</b> .....	35

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Diagrama da consistência metodológica.....	7
<b>Figura 2.</b> Projeções para o PIB global entre 2020 e 2100 a partir do cenário SSP2.....	9
<b>Figura 3.</b> Projeção do PIB brasileiro entre 2020 e 2050 a partir do cenário SSP2 (Índice 2011=1).....	10
<b>Figura 4.</b> Participação das fontes renováveis na oferta interna de energia do Brasil nos cenários avaliados (REF NetZero).....	14
<b>Figura 5.</b> Consumo de energia primária no Brasil para os cenários REF e NetZero.....	15
<b>Figura 6.</b> Participação das fontes na capacidade instalada de energia elétrica no Brasil, para os cenários REF e NetZero.....	16
<b>Figura 7.</b> Participação das fontes na geração de energia elétrica no Brasil, para os cenários REF e NetZero.....	17
<b>Figura 8.</b> Panorama do mercado de óleo e gás natural do Brasil, para os cenários REF e NetZero.....	18
<b>Figura 9.</b> Produção de biocombustíveis no Brasil, para os cenários REF e NetZero.....	20
<b>Figura 10.</b> Consumo energético na indústria para o Brasil, para os cenários REF e NetZero.....	21
<b>Figura 11.</b> Participação dos combustíveis por km percorrido de passageiro rodoviário no setor de transportes rodoviário, no Brasil, para os cenários REF e NetZero.....	23
<b>Figura 12.</b> Mudança cumulativa no uso do solo no Brasil, para os cenários REF e NetZero (ano base = 2020).....	24
<b>Figura 13.</b> Tratamento dos resíduos sólidos urbanos para o Brasil, no cenário REF e NetZero.....	26
<b>Figura 14.</b> Emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil, para os cenários REF e NetZero.....	27
<b>Figura 15.</b> Emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil por tipo emissor, nos cenários REF e NetZero.....	27
<b>Figura 16.</b> Emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil por setor, nos cenários REF e NetZero.....	28
<b>Figura 17.</b> Troca de informações entre modelos de avaliação integrada.....	36
<b>Figura 18.</b> Esquema metodológico de modelagem dos cenários de descarbonização.....	38
<b>Figura 19.</b> Representação esquemática do modelo BLUES.....	39
<b>Figura 20.</b> Compatibilização das regiões hidrográficas e energéticas no Modelo BLUES.....	40
<b>Figura 21.</b> Transições de uso da terra modeladas no BLUES.....	43

## Lista de tabelas

<b>Tabela 1.</b> Definição dos conceitos de neutralidade de carbono e neutralidade climática.....	12
<b>Tabela 2.</b> Tecnologias e suas definições.....	31
<b>Tabela 3.</b> Parâmetros Técnicos e Econômicos das Tecnologias de Geração Elétrica no BLUES.....	41
<b>Tabela 4.</b> Produtos agropecuários modelo BLUES.....	42



# Introdução

O Estado de Minas Gerais busca um caminho de desenvolvimento com baixas emissões de gases de efeito estufa (GEE), visando a integração das agendas ambientais, sociais e econômicas. O Estado criou e institucionalizou o *Fórum Mineiro de Energia e Mudanças Climáticas* (FEMC), o *Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais* (PEMC), e aderiu à campanha *Race to Zero*, em conjunto com as federações da indústria e da agricultura do Estado.

O Estado de Minas Gerais reconhece a agenda de mudanças climáticas como uma prioridade governamental, tendo como duas importantes missões: a atualização do *Inventário de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa* e o *Plano de Ação Climática*. Além disso, o Estado está também elaborando o *Plano de Descarbonização*, para o qual será proposto um conjunto de ações voltadas à meta de que o Estado alcance a neutralidade climática de suas atividades econômicas a um mínimo custo possível até 2050. Essas ações devem estar em consonância com uma recuperação econômica verde pós pandemia da COVID-19 e com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU – Organização das Nações Unidas.

Para elaborar seu *Plano de Descarbonização*, o Estado está sendo apoiado pelo CDP. O CDP é uma organização internacional sem fins lucrativos que gere o sistema de divulgação global para investidores, empresas, cidades, Estados e regiões para gerir os seus impactos ambientais. Nos últimos 20 anos, a organização criou um sistema que resultou num envolvimento sem paralelo em questões ambientais em todo o mundo.

A construção do Plano de Descarbonização de Minas Gerais visa aliar técnicas analíticas que fazem uso da melhor ciência disponível a um processo participativo junto a atores de toda a sociedade atentos às características e interesses locais. A execução dos estudos técnicos que subsidiarão a elaboração do plano exige amplo conhecimento na área de mitigação de emissões para construção das trajetórias de baixo fator de emissões de GEE. A primeira etapa é a modelagem dos cenários de referência e de descarbonização, da qual se objetiva a obtenção das trajetórias de emissões de GEE da economia para que se atendam às demandas dos setores econômicos ao mínimo custo possível. Para isso, foram usados modelos analíticos de avaliação integrada, incluindo otimização energética e ambiental, e equilíbrio geral computável da economia. Esses modelos já haviam sido utilizados em iniciativas pretéritas de mesmo escopo, particularmente com vistas a subsidiar a elaboração de instrumentos de política climática e ambiental em âmbito nacional e regional.

A modelagem de cenários que subsidiarão a elaboração do Plano de Descarbonização do Estado de Minas Gerais está sendo construída através da integração de dois modelos, um econômico e um tecnológico<sup>1</sup>. A modelagem econômica é feita pelo EFES (*Economic Forecasting Equilibrium System*), um modelo de equilíbrio geral computável baseado em matrizes insumo-produto. Esse modelo é desenvolvido pelos laboratórios NEREUS, ligado à Universidade de São Paulo (USP) e NEMEA, ligado à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). A modelagem tecnológica, por sua vez, é realizada principalmente pelo BLUES (*Brazilian Land-Use and Energy System model*), um modelo de avaliação integrada para o Brasil desenvolvido pelo laboratório Cenergia (COPPE/UFRJ).

<sup>1</sup>A modelagem dos cenários segue a metodologia do Plano de Descarbonização de Pernambuco (PDPE), estudo desenvolvido pelo laboratório Cenergia em parceria com o GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit) e o WRI (World Resources Institute), disponível em: <https://semas.pe.gov.br/plano-de-descarbonizacao-de-pernambuco-contribuicoes/>.



Foto: fpcamp | Unplash

Juntos, esses modelos irão fornecer contextualização e subsídios para a construção de narrativas e cenários de referência e descarbonização/neutralidade climática para o Brasil, Sudeste e o Estado de Minas Gerais. As narrativas estão sendo construídas de forma integrada e discriminadas setorialmente, considerando uma desagregação setorial que abarca os setores de Energia (setor elétrico, óleo e gás, biocombustíveis, indústria e edificações), Transportes, Resíduos e AFOLU – agropecuária, floresta e outros usos do solo.

Portanto, o primeiro conjunto de resultados desse projeto expressa as projeções de consumo de energia e emissões de GEE setoriais em nível nacional. Sendo assim, o objetivo desse relatório é apresentar os resultados dos cenários de longo prazo com as projeções para os cenários de referência

e de descarbonização para o Brasil, no horizonte temporal de 2020 a 2050. Para isso, é apresentada uma contextualização inicial com as premissas econômicas adotadas e a definição dos cenários (Seção 2). Em seguida, é feita uma breve exposição dos resultados, incluindo projeções de oferta interna de energia, capacidade e geração elétrica, produção de combustíveis, atendimento da demanda do setor de transportes, mudanças do uso do solo e tratamento de resíduos (Seção 3). Por últimos, apresentam-se as considerações finais, destacando-se mensagens chaves da modelagem integrada para o Brasil (Seção 4).

Adicionalmente, o **Anexo A** contém um glossário com as principais tecnologias resultantes dos cenários modelados, enquanto o **Anexo B** apresenta a estrutura da modelagem integrada, com a descrição dos modelos utilizados.

# Contextualização

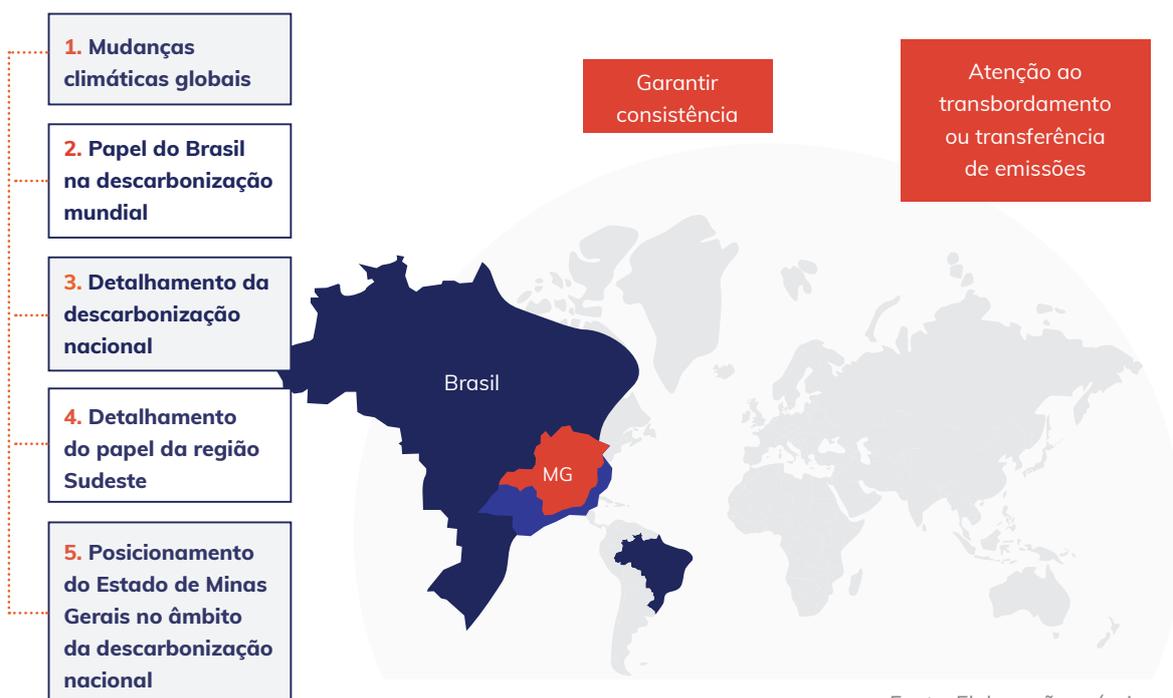
## Por que tratar Brasil e Sudeste antes de Minas Gerais?

Uma vez que as mudanças climáticas são uma problemática de escala planetária com impactos globais, soluções globais devem ser pensadas. Estudos com modelos globais e regionais de avaliação de estratégias de mitigação e desenvolvimento tecnológico conseguem entender o papel de cada região no enfrentamento das mudanças climáticas. Esses modelos demonstram, por uma lógica de otimização, por exemplo, que a Floresta Amazônica não deveria ser desmatada. Mostra-se ser mais custo-efetivo utilizar técnicas de captura e armazenamento de carbono baseadas na natureza (aflorestamento e reflorestamento, por exemplo), do que reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) em setores de difícil descarbonização, designadamente, o marítimo e o de aviação. Seguindo a mesma lógica, a neutralidade climática de um Estado talvez não seja a solução ótima para o país, pois alguns Estados

têm maior dependência de atividades econômicas carbono-intensivas, enquanto outros Estados apresentam oportunidades de obter diversos cobenefícios com a recuperação, captura e armazenamento de carbono. Assim, políticas e planos nacionais afetam todos os Estados do país, que também são afetados por suas próprias diretrizes regionais.

Para elaborar o **Plano de Descarbonização de Minas Gerais**, em uma primeira etapa, considera-se o papel do Brasil na descarbonização mundial, para depois realizar um detalhamento nacional focando no papel do Sudeste nas projeções de demanda e potenciais medidas de mitigação para a região. Por fim, realiza-se um refinamento das informações (também referido como *downscaling*) para Minas Gerais, posicionando o Estado nos contextos regional e nacional, garantindo consistência com as políticas e planos existentes (**Figura 1**). Vale lembrar que as etapas de detalhamento regional e de *downscaling* são parte posterior do estudo e não estão contempladas nesse relatório.

**Figura 1.** Diagrama da consistência metodológica



Fonte: Elaboração própria

## Premissas econômicas e cenários desenvolvidos

Avaliar estratégias de mudanças climáticas é desafiador por causa da complexidade em torno do curso da própria mudança do clima, da evolução de trajetórias socioeconômicas, assim como o contexto sociocultural e institucional em longos horizontes de tempo. Além disso, em longos horizontes temporais, as estimativas serão altamente dependentes das premissas sobre como evoluem políticas climáticas e se desenvolvem as tecnologias. Dessa forma, a análise de cenários é útil para simplificar o exercício analítico, fornecendo uma narrativa plausível para ancorar dados e suposições do arcabouço de modelagem e, assim, ajudar a identificar possíveis opções de estratégias tecnológicas e não tecnológicas de baixo fator de emissão de GEE.

Cenários de transição são usados para explorar diferentes opções de mitigação para alcançar um determinado resultado climático. São desenvolvidos por acadêmicos (utilizados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC<sup>2</sup> (do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*) e por diferentes agências internacionais (IEA – *International*

*Energy Agency*, IRENA – *International Renewable Energy Agency* etc.), assim como por empresas de vários setores, como o de energia (Shell, BP, Total, Equinor). Vale destacar que cenários não são uma previsão do futuro, nem uma indicação do caminho mais provável. São apenas trajetórias ilustrativas que enquadram um conjunto de possibilidades que seguem as mesmas premissas (IPCC, 2018; IPCC, 2022).

As premissas macroeconômicas incorporadas na modelagem econômica baseiam-se nos *Shared Socioeconomic Pathways*<sup>3</sup> (SSPs), que descrevem, qualitativa e quantitativamente, diferentes trajetórias de evolução da sociedade, economia e ecossistemas até o final do século (Riahi et al., 2017). Mais especificamente, no SSP2<sup>4</sup> (*Middle of the Road*) o mundo segue um caminho em que as tendências sociais, econômicas e tecnológicas não mudam significativamente, sendo marcado por padrões históricos. As projeções econômicas do SSP2 foram desenvolvidas pela OECD *Environment Directorate*, OECD *Economics Department*, Wittgenstein Centre for Demography and Global Human Capital e Potsdam Institute for Climate Impact Research.



Foto: Chelsea | Unplash

<sup>2</sup>O Grupo de Trabalho III do IPCC, avalia os cenários desenvolvidos por instituições de pesquisa e acadêmicos em todo o mundo, e podem ser encontrados em seus diversos relatórios (IPCC, 2014; IPCC, 2018; IPCC, 2022). Estão também disponíveis na base de dados do IPCC WG III AR6: <https://data.ene.iiasa.ac.at/ar6/>

<sup>3</sup>Os SSPs são um conjunto de cinco trajetórias socioeconômicas mundiais com características distintas entre elas para crescimento populacional, desenvolvimento econômico, cooperação entre os países, evolução de níveis de desigualdade, entre outros. Representam um conjunto de trajetórias possíveis para o futuro.

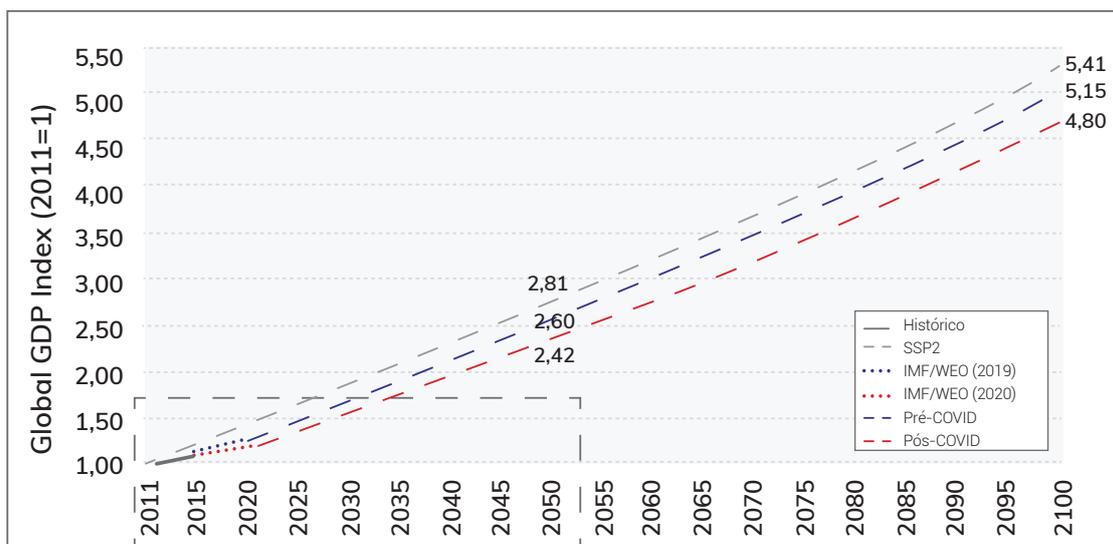
<sup>4</sup>A trajetória mais utilizada é o SSP2, que representa a evolução das tendências atuais, sem grandes mudanças ou interrupções.

Conforme ilustrado na **Figura 2**, a primeira etapa para a elaboração das premissas macroeconômicas utilizadas neste estudo envolveu a atualização do cenário SSP2, a partir de dados históricos do *World Energy Outlook* (IEA, 2019), destacados na linha preta. Além disso, houve a necessidade de realizar ajustes na trajetória de longo prazo de Produtos Interno Bruto (PIB) regionais, a partir das projeções mais recentes do FMI/WEO (2020), de maneira a incorporar os impactos da pandemia da COVID-19 sobre a atividade econômica<sup>5</sup> em 2020, em destaque na linha verde tracejada. Assim sendo, foram incorporados impactos da pandemia sobre a atividade econômica global de modo que a recuperação econômica acompanhe a taxa de crescimento econômico anual do SSP2 pós-2020.



Foto: Towfiqu barbhuiya | Unplash

**Figura 2.** Projeções para o PIB global entre 2020 e 2100 a partir do cenário SSP2



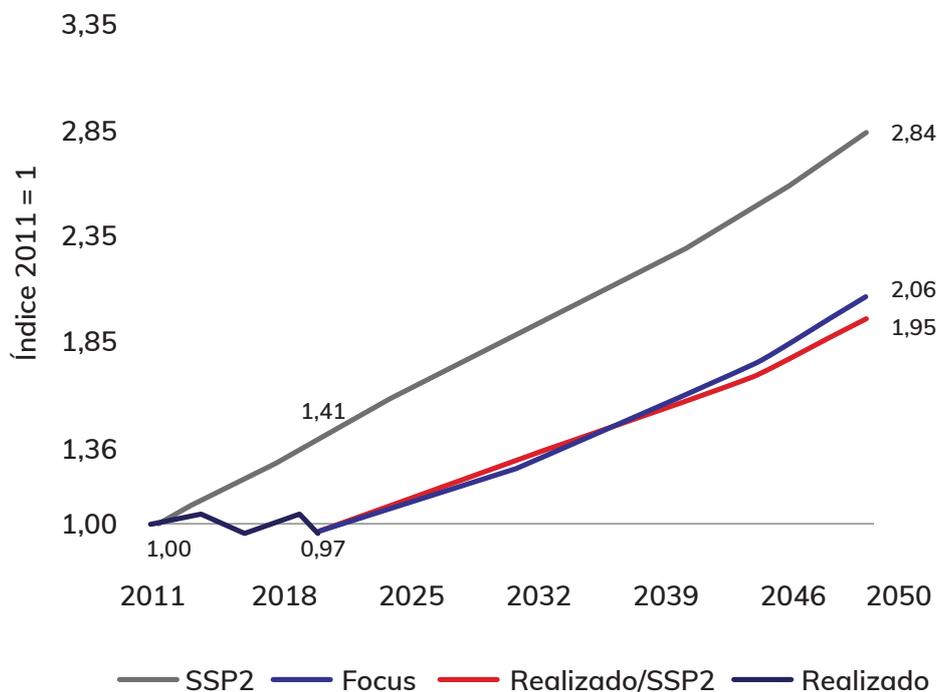
Fonte: Elaboração própria com base em IEA (2019) e FMI/WEO (2020)

<sup>5</sup>De acordo com FMI/WEO (2020), a crise econômica causada pela pandemia foi profunda e a produção econômica de economias avançadas e de economias emergentes vai se manter, em 2021, abaixo dos níveis de 2019. Países que dependem de serviços de intenso contato físico entre pessoas, bem como regiões exportadoras de petróleo devem enfrentar recuperações mais fracas em comparação às economias lideradas pelo setor industrial. Para o Brasil, por exemplo, as projeções indicam uma queda de 5,8% do PIB, comparado a 2019, com uma recuperação de 2,8% em 2021.

Conforme ilustrado pela **Figura 3** para o caso brasileiro, mesmo não prevendo nenhuma recuperação pós-crise (COVID-19), o cenário SSP2 (linha cinza) projetava crescimento médio superior ao estimado pelo cenário da consultoria econômica Focus (linha azul claro). No entanto, a partir de 2031, o cenário SSP2 prevê desaceleração do crescimento, em linha com expectativa de redução do crescimento populacional, cuja taxa estimada no cenário SSP2 é 0,3% a.a., entre 2020 e 2050. Portanto, o cenário Realizado/SSP2 a ser utilizado neste estudo reflete a atualização das taxas de crescimento históricas do PIB, entre 2011-2019, e os impactos da COVID-19 sobre a atividade econômica, no Brasil, em 2020, conforme ilustrado pela linha laranja na **Figura 3**.

Os cenários econômicos servem de base para a evolução das demandas setoriais de energia e agropecuária, necessárias ao modelo tecnológico BLUES – *Brazilian Land-Use and Energy System model* (Rochedo et al., 2018; Koberle, 2018). Em poucas palavras, o BLUES é um modelo de otimização que tem como principal objetivo atender a demanda por serviços energéticos do país com o menor custo possível. O modelo minimiza o custo total do sistema de energia, incluindo os setores de geração de eletricidade, agropecuária, indústria, transporte e edificações, sujeitos a restrições que representam restrições do mundo real para toda a gama de variáveis em questão. Ele também inclui o setor de uso da terra, implicitamente espacializado. O **Anexo B** inclui uma exposição detalhada do modelo.

**Figura 3.** Projeção do PIB brasileiro entre 2020 e 2050 a partir do cenário SSP2 (Índice 2011=1)



Fonte: Elaboração própria a partir de Febraban (2020)<sup>6</sup>

<sup>6</sup>Comunicação pessoal, 14/10/2021, Diretoria de Economia, Regulação Prudencial e Riscos.

Para este projeto, foram elaborados dois cenários futuros: **(1) Cenário de Referência denominado de “REF”;** e **(2) Cenário de Descarbonização/Neutralidade Climática designado de “NetZero”.** A descrição da narrativa dos cenários é apresentada em seguida:

## 1) Cenário Referência (REF):

- **Cenário tendencial que considera políticas correntes relativas aos setores do sistema energético e de uso e mudanças no uso do solo, como:**
  - a. Capacidades instaladas atuais e contratadas para fontes de geração elétrica, refinarias, destilarias, ativos de transmissão e de distribuição de energia elétrica;
  - b. Políticas energéticas em curso no país:
    - i. Finalização da usina nuclear Angra 3 entre 2025 e 2030;
    - ii. Continuidade da operação da termoeletrica a carvão mineral Jorge Lacerda até 2040; e
    - iii. Implementação da mistura obrigatória de biodiesel em 20% (B20) a partir 2028.
  - c. Objetivos de descarbonização da *International Maritime Organization (IMO)* e da *International Air Transport Association (IATA)*;
  - d. Tecnologias de produção agrícola atuais; e
  - e. Atividades de desmatamento seguindo trajetórias projetadas por *Rochedo et al.* (2018).

## 2) Cenário de Neutralidade Climática (NetZero):

- **Cenário trajetória visando emissões líquidas zeradas de GEE em 2050, o qual:**
  - a. A soma das emissões provenientes de todas as fontes e setores da economia, ou seja, toda a emissão do país, deverá ser compensada por tecnologias ou meios de remoção de GEE da atmosfera, como é o caso do re/aflorestamento;
  - b. Apresenta uma restrição na trajetória de emissões de GEE, o que resulta em inovações e rupturas tecnológicas como forma de atingir a neutralidade de emissões no país em 2050; e
  - c. Assume também uma trajetória de desmatamento zero a partir de 2030 e os objetivos de descarbonização da IMO e da IATA a partir de 2023.

É importante destacar que o termo *Net Zero* tem duas variações, com significados e impactos bastante diferentes, como pode ser observado na **Tabela 1**. Nesse estudo, utilizou-se o termo para abordar a neutralidade climática considerando as emissões dos três principais GEE de origem antropogênica, a saber: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O); e não apenas às de CO<sub>2</sub>. Dessa forma, todas as emissões de GEE de origem antropogênica do Brasil precisam ser compensadas por meio da remoção da atmosfera de um volume de CO<sub>2</sub> tal, que venha inclusive a compensar emissões de gases não-CO<sub>2</sub>, que não têm como serem removidos da atmosfera. O resultado disso é um balanço líquido zero de emissões de GEE naquele momento, usando a métrica de GWP AR5.

Ressalta-se também que a emissão total de GEE é calculada em CO<sub>2</sub>-equivalente (CO<sub>2</sub>eq), uma medida que contabiliza o poder de aquecimento global dos diferentes GEE. Para chegar ao total, multiplica-se a emissão de cada gás pelo seu poder de aquecimento global em um horizonte temporal de 100 anos (*global warming potential – GWP100*). De acordo com o Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (2014), os GWPs apresentam a seguinte relação:

- **1 tonelada de CH<sub>4</sub> é equivalente a 28 toneladas de CO<sub>2</sub>;**
- **1 tonelada de N<sub>2</sub>O é equivalente a 265 toneladas de CO<sub>2</sub>.**

**Tabela 1.** Definição dos conceitos de neutralidade de carbono e neutralidade climática

Conceitos	O que significa	Exemplo
<i>Net Zero Carbon</i> ou Carbono Neutro	Balanço entre emissões e remoções apenas de CO <sub>2</sub>	China será carbono neutro até 2060.
<i>Net Zero Emissions</i> ou Neutralidade Climática	Balanço entre emissões e remoções de todos os GEE	Meta do Acordo de Paris: balancear todas as emissões de GEE (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O).

Fonte: Elaboração própria

# Resultados da modelagem integrada



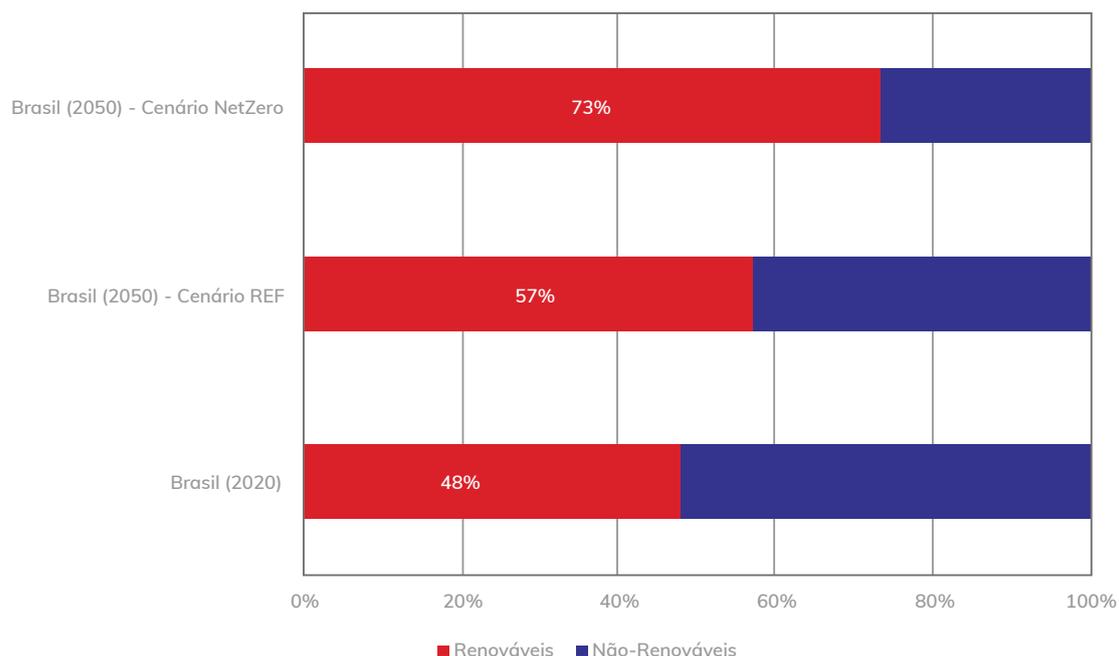
Foto: allexxandar | Adobe Stock

Essa seção apresenta os resultados obtidos na modelagem de cenários de longo prazo para o Brasil, considerando os setores de Energia, Transportes, Resíduos e AFOLU – agropecuária, floresta e outros usos do solo. Primeiramente, é exposto um panorama geral da oferta de energia no país. Em seguida, são mostrados os resultados por setor, destacando-se as diferenças entre o Cenário Referência (REF) e o Cenário de Neutralidade Climática (NetZero) – considerando as emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O –, e as principais tendências no contexto da transição energética.

## Contexto de longo prazo

A análise das tendências para o longo prazo dos setores energético e de uso da terra mostram trajetórias divergem significativamente, dependendo da ambição climática a que se deseja chegar. Atualmente, o Brasil possui a matriz energética com aproximadamente metade da sua energia primária oriunda de fontes renováveis (48%) e a outra metade de fontes fósseis. Isso caracteriza o Brasil como um país que possui uma maior renovabilidade do que a média mundial, de apenas 14% (EPE, 2021). A **Figura 4** compara a participação das fontes renováveis na oferta interna de energia entre o Brasil e o mundo atualmente, e o Brasil em 2050 segundo os dois cenários desenvolvidos. Percebe-se que há muito a ser feito para alcançar a neutralidade climática, e que os cenários REF e NetZero representam duas visões de mundo muito diferentes. O cenário NetZero em 2050 conta com uma predominância na partição das renováveis (73%) para atingir a neutralidade climática.

**Figura 4.** Participação das fontes renováveis na oferta interna de energia do Brasil nos cenários avaliados (REF, NetZero)



Fonte: Elaboração própria; dados sobre a matriz em 2020 derivam da EPE (2021)

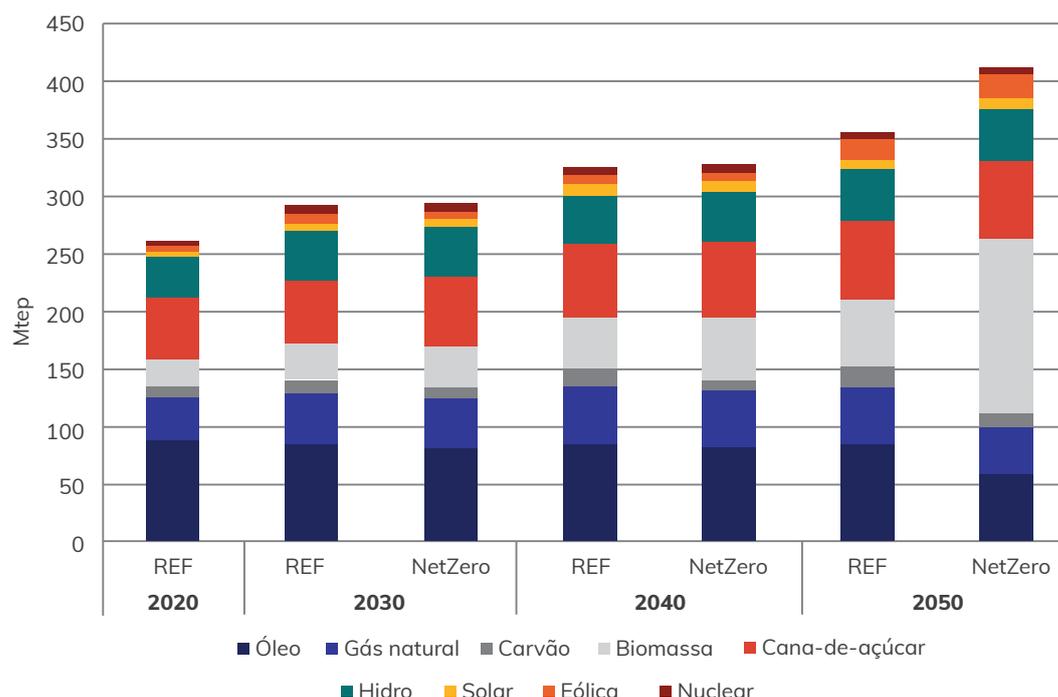
Já **Figura 5** apresenta o consumo de energia primária<sup>7</sup> atual e futuro, ou seja, um detalhamento em relação à **Figura 4**.

É possível observar pela **Figura 5**, que para as projeções do cenário REF há uma certa manutenção das fontes de energia consumidas atualmente, com uma leve perda na participação das fontes fósseis ao longo dos anos.

Isso se reflete na origem fóssil de aproximadamente metade da energia primária nacional, com destaque para o petróleo e o gás natural. Pelo lado das fontes renováveis, são destaques a energia hídrica, utilizada na produção de eletricidade, e a cana-de-açúcar, para a produção de etanol para o setor de transportes, e de eletricidade a partir do bagaço. A energia solar, eólica e a biomassa ganham participação no período analisado.

<sup>7</sup>O Balanço Energético Nacional 2021, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) define energia primária como: "Produtos energéticos providos pela natureza na sua forma direta, como petróleo, gás natural, carvão mineral, resíduos vegetais e animais, energia solar, eólica etc." (EPE, 2021, p. 207).

**Figura 5.** Consumo de energia primária no Brasil para os cenários REF e NetZero



Nota: Mtep: milhões de toneladas equivalentes de petróleo (unidade de energia).

Fonte: Elaboração própria; dados sobre a matriz em 2020 derivam de EPE (2021)

Por outro lado, no cenário NetZero, mudanças significativas podem ser observadas ao longo do período 2020-2050. Primeiramente, há uma **diminuição abrupta das fontes fósseis** que representariam apenas 27% do total da energia primária em 2050. Destaque é a queda na participação do óleo cru. Já as fontes renováveis ganham relevância, principalmente com o **aumento expressivo da utilização da biomassa**, que tem um papel muito importante para a descarbonização do setor de transportes. Essa é uma sinalização clara da necessidade de reduzir o consumo de combustíveis fósseis em cenários de transição energética, substituindo-os por combustíveis renováveis sustentáveis, designadamente bioquerosene e diesel produzido a partir de biomassa. Esse resultado é corroborado pela Agência

Internacional de Energia em seu relatório *Net Zero by 2050*<sup>8</sup> (IEA, 2021), que mostra uma necessidade de redução de aproximadamente 80% da energia fóssil consumida atualmente.

## Setor de energia

Os resultados de energia contemplam o setor elétrico, de óleo e gás, biocombustíveis, edificações<sup>9</sup> (residencial e comercial/serviços) e a indústria. Eles também revelam a grande necessidade de mudanças estruturais e disruptivas nos cenários NetZero, para que seja alcançada a neutralidade climática no Brasil. O setor de edificações não é abordado neste relatório devido sua baixa contribuição no total das emissões nacionais diretas de GEE.

<sup>8</sup>O relatório detalha uma trajetória para atingir emissões líquidas nulas de CO<sub>2</sub> globalmente em 2050 nos setores de energia e industrial.

<sup>9</sup>O setor de edificações na modelagem integrada contempla a emissão de GEE associada ao consumo final de combustíveis fósseis por parte das famílias e dos estabelecimentos comerciais (shoppings, hospitais, restaurantes etc.), como o gás natural e gás liquefeito de petróleo (GLP). Não estão contabilizadas as emissões decorrentes da produção de eletricidade, uma vez que elas já estão incluídas no setor elétrico.

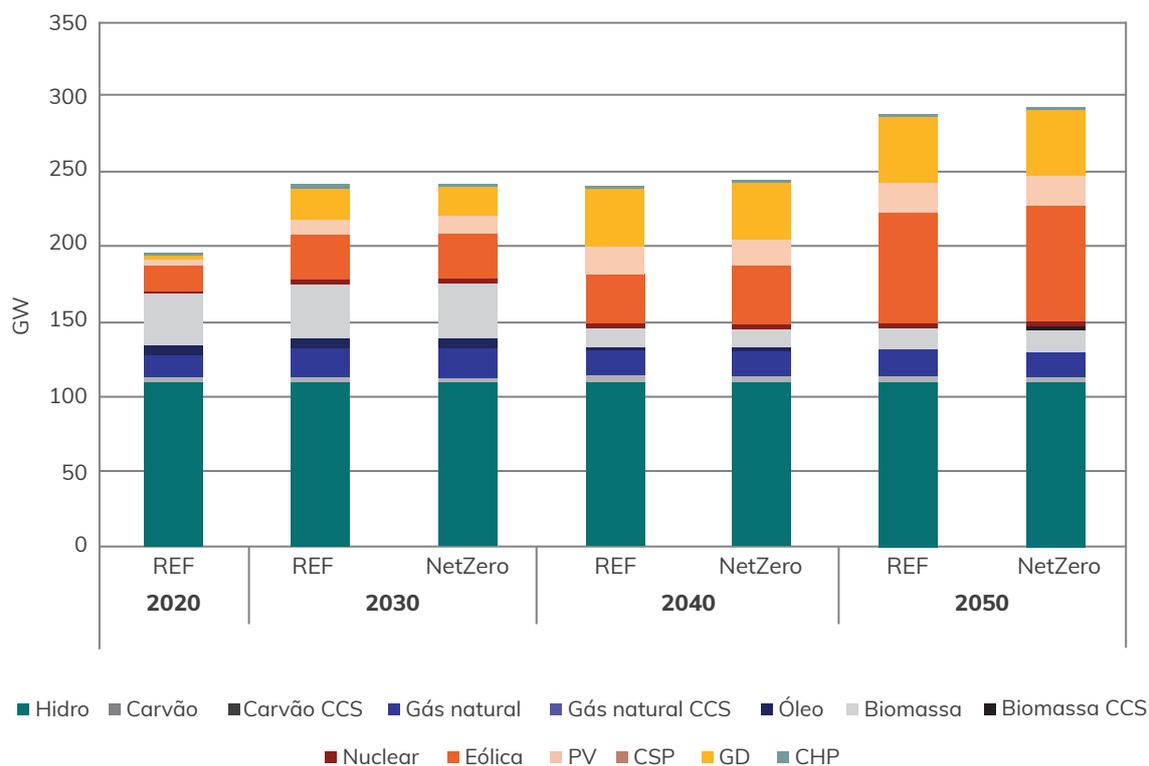
## Setor elétrico

Começando pelo setor elétrico, a **Figura 6** mostra a evolução da capacidade elétrica instalada, discriminada por fonte e cenário. Ambos os cenários REF e NetZero apresentam uma trajetória similar, visto que a matriz de geração de energia elétrica brasileira apresenta uma elevada capacidade instalada de renováveis. Destaca-se a **redução da dependência das hidrelétricas** nos dois cenários, saindo dos atuais 55% de capacidade instalada em 2020 para 38% em 2050 tanto no cenário REF como no NetZero. Além disso, **umenta-se a importância de outras fontes renováveis**, principalmente da eólica saindo de 9% em 2020 para 25% e 27% em 2050, nos cenários REF e NetZero respectivamente. A energia solar também ganha relevância através de

usinas fotovoltaicas (PV) e da geração distribuída (GD), o que resulta em um aumento de sua participação na capacidade instalada, que sai de 2% em 2020 para 10% em 2050 no cenário NetZero.

Há também uma necessidade de **expansão das linhas de transmissão** do Sistema Interligado Nacional (SIN) para comportar o aumento do fluxo de eletricidade. Essa expansão ocorreria tanto dentro dos subsistemas, quanto no intercâmbio de energia elétrica entre eles. Além disso, vale mencionar o aumento da eficiência nas novas instalações de transmissão e distribuição de eletricidade, reduzindo as perdas no transporte.

**Figura 6.** Participação das fontes na capacidade instalada de energia elétrica no Brasil, para os cenários REF e NetZero



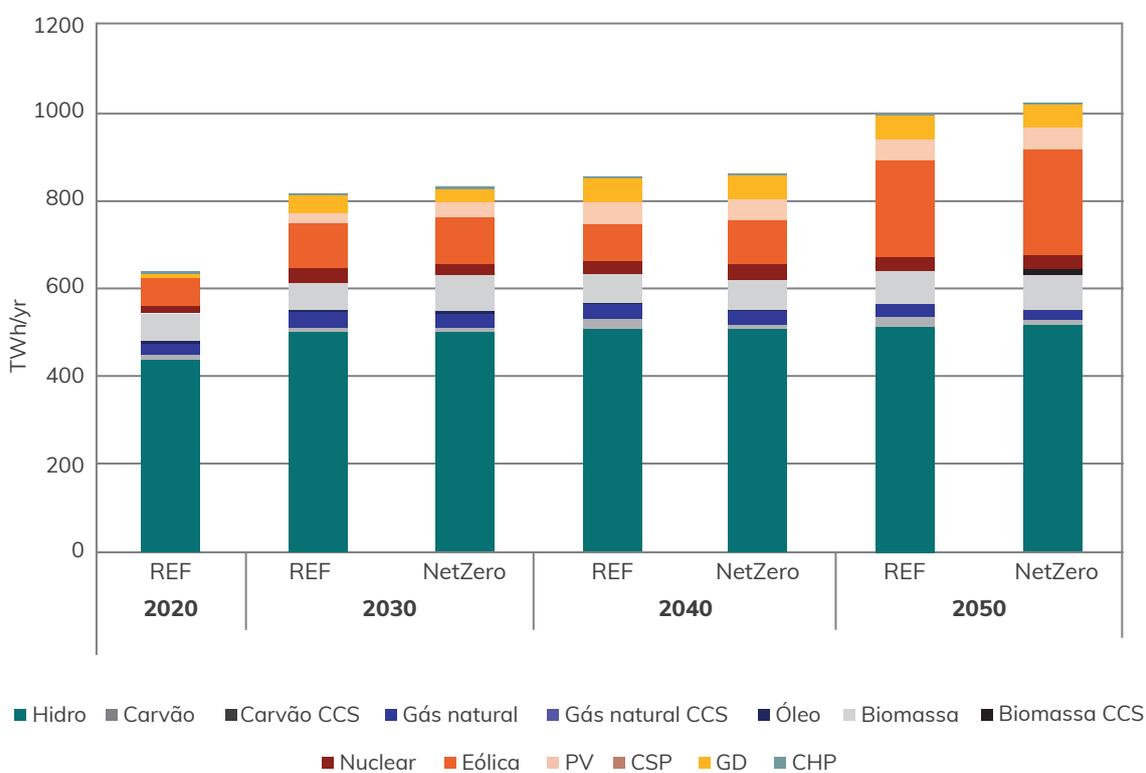
Nota: CCS= carbon capture and storage; PV = usina fotovoltaica; CSP = concentrated solar power; GD = geração distribuída fotovoltaica; CHP = combined heat and power. Para mais informações acessar o glossário no **Anexo A**.  
Fonte: Elaboração própria; dados sobre a matriz em 2020 derivam de EPE (2021)

No cenário NetZero observa-se uma manutenção de capacidade das termelétricas a gás natural, necessárias para prover uma maior segurança ao sistema elétrico. No entanto, no cenário analisado não houve necessidade de acionamento dessas termelétricas, cumprindo apenas o papel de *backup*. Consequentemente, a expansão da capacidade elétrica instalada de centrais de geração eólica e solar (**Figura 6**) reflete na maior utilização dessas fontes para a geração elétrica (**Figura 7**).



Foto: Asia Chang | Unplash

**Figura 7.** Participação das fontes na geração de energia elétrica no Brasil, para os cenários REF e NetZero



Nota: CCS= *carbon capture and storage*; PV = usina fotovoltaica; GD = geração distribuída fotovoltaica; CHP = *combined heat and power*. Para mais informações acessar o glossário no **Anexo A**.  
 Fonte: Elaboração própria

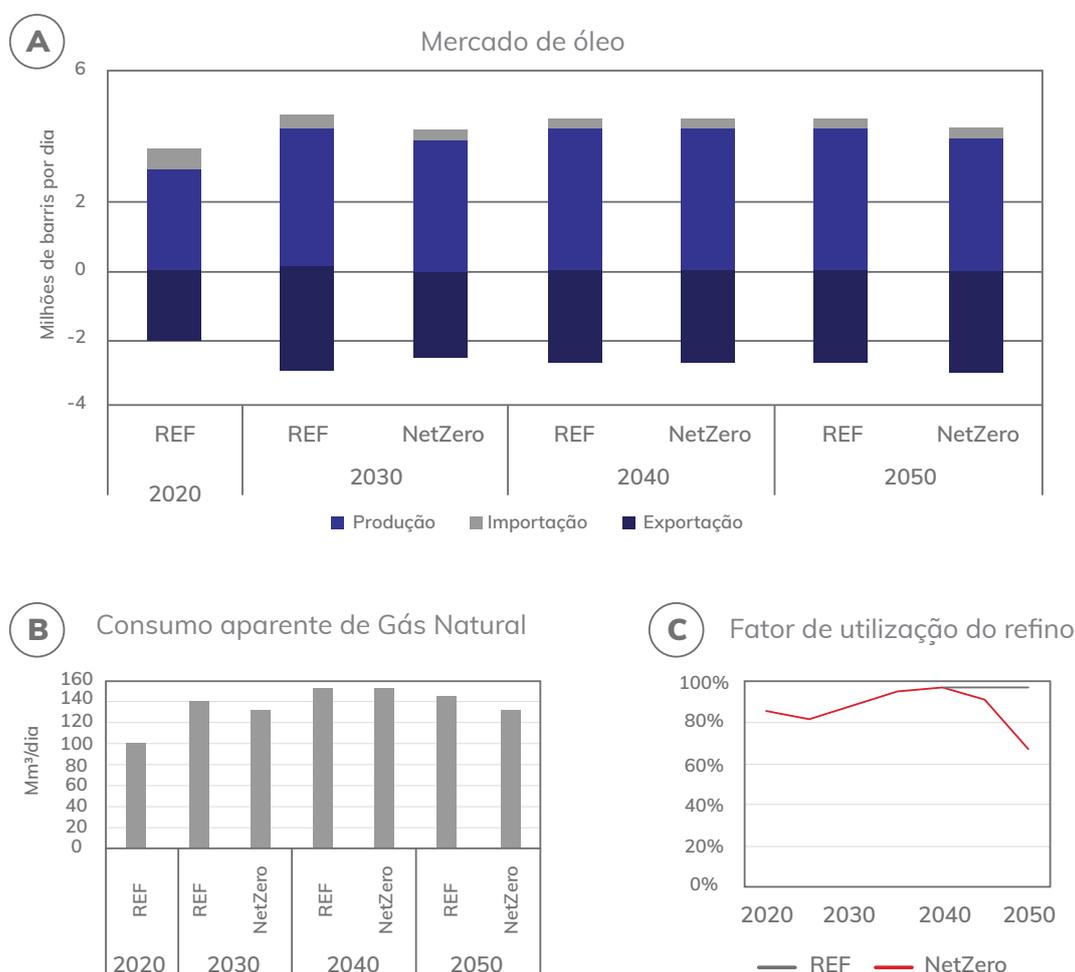
## Setor de óleo e gás natural

No setor de óleo e gás natural, a redução do consumo de derivados afetaria diretamente toda a cadeia do petróleo, desde o comércio exterior, até as refinarias, conforme exposto na **Figura 8**.

No cenário NetZero, diante de uma necessidade da redução de consumo de combustíveis fósseis, como a gasolina, o óleo diesel e outros derivados de petróleo, os resultados da modelagem desenvolvida indicam mudanças nesse setor. Primeiramente, apesar da

diminuição do consumo doméstico de derivados de petróleo comparando 2020 com 2050, é observado um **aumento na produção brasileira de petróleo**. Parte crescente dessa produção é voltada a atender a demanda externa global no cenário NetZero, devido ao **aumento das exportações** de 0,95 milhões de barris por dia. Esse fato, em conjunto com a redução das importações tornam a **produção nacional ainda mais dependente do mercado internacional de petróleo**.

**Figura 8.** Panorama do mercado de óleo e gás natural do Brasil, para os cenários REF e NetZero



Fonte: Elaboração própria

Naturalmente, essas mudanças se refletiriam também no refino do petróleo, dado que haveria uma menor necessidade de processamento do óleo bruto para transformá-lo nos derivados consumidos no Brasil. A partir de 2045, uma queda pode ser percebida no fator de utilização das refinarias do cenário NetZero (gráfico “C” da **Figura 8**), que mede o percentual de utilização das refinarias em relação à sua capacidade de processamento primário total (destilação atmosférica). Dessa forma, o fator de utilização do refino do petróleo caiu de 81% em 2020 para 66% em 2050, ainda significativo devido ao coprocessamento, óleo de pirólise e a petroquímica.

## Setor de biocombustíveis

As mudanças no setor de óleo e gás natural levam ao terceiro setor tratado nos resultados de energia desse estudo: o setor de biocombustíveis, em especial a produção de biocombustíveis celulósicos.

Biocombustíveis são combustíveis a partir de biomassa, e por isso se caracterizam como renováveis no caso de o índice de renovabilidade desta ser igual ou superior a um. Nesse estudo, ganham destaque o diesel biocombustível e o querosene biocombustível de aviação (ou *biojet*)<sup>10</sup>, que despontam como duas possibilidades de substituição aos combustíveis fósseis tradicionais. Eles são produzidos a partir da conversão termoquímica da biomassa via Síntese de Fischer-Tropsch (FT)<sup>11</sup>, que resulta em combustíveis de alta qualidade e que podem ser utilizados nos motores convencionais. Na Síntese de Fischer-

Tropsch, é produzido um conjunto de combustíveis similares aos derivados de petróleo, mas oriundos da biomassa, e, por isso, chamados de biocombustíveis avançados. São eles: diesel, querosene de aviação, *biobunker* para transporte marítimo, gasolina, nafta petroquímica, entre outros. Além disso, possibilitam o aproveitamento da infraestrutura existente para o transporte, distribuição e abastecimento utilizada pelos combustíveis fósseis, o que representa uma facilidade para a aplicação dessa tecnologia no mercado.

Nesse contexto, a **Figura 9** apresenta a produção de biocombustíveis celulósicos nos dois cenários analisados. Primeiramente, é importante ressaltar que o gráfico é não aditivo, ou seja, alguns dos biocombustíveis apresentados na **Figura 9** são utilizados como insumo para a produção de outros. Como por exemplo, o caso da nafta biocombustível que é utilizada como insumo para a produção de querosene biocombustível (para mais detalhes sobre os compostos dos biocombustíveis ver glossário do **Anexo A**).

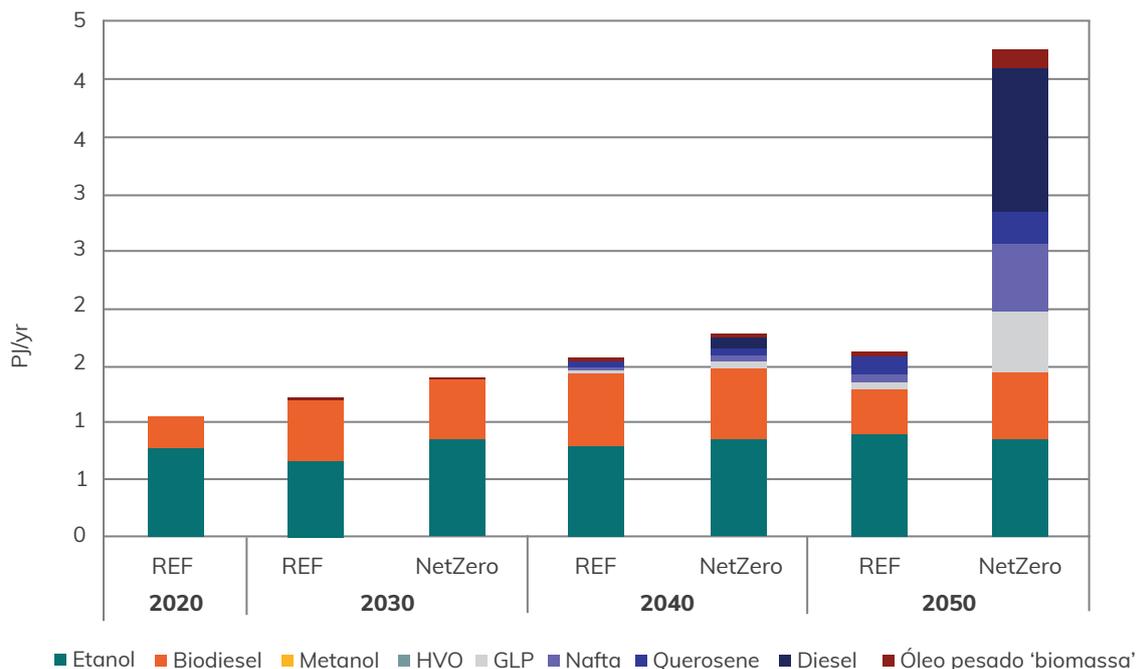
Dessa forma, a tem a função de apresentar a composição dos biocombustíveis produzidos nos cenários analisados. Assim, é possível observar o aumento da penetração de biocombustíveis avançados (nafta, querosene, diesel etc.) ao longo dos anos, mesmo no cenário REF. Aumento ainda mais expressivo no cenário NetZero, com destaque para o diesel biocombustível (cor azul).

---

<sup>10</sup>Mais informações sobre o diesel biocombustível pode ser encontrada em (Tagomori, 2017) e sobre o bioquerosene de aviação, em (Carvalho, 2017).

<sup>11</sup>Processo conhecido também como FT-BTL (Fischer-Tropsch Biomass-to-Liquids), devido à transformação da biomassa em líquidos combustíveis.

**Figura 9.** Produção de biocombustíveis no Brasil, para os cenários REF e NetZero



Nota: Petajoule (PJ) é a unidade de energia correspondente a 1 quatrilhão de Joules ( $10^{15}$  J). Para mais informações, consultar a descrição dos termos no glossário (Anexo A). Fonte: Elaboração própria

A modelagem integrada indica a utilização de biocombustíveis celulósicos por dois motivos principais: (i) **descarbonização de segmentos do setor de transportes, como o aéreo, o marítimo e o transporte de cargas**<sup>12</sup>, e (ii) a **captura e armazenamento do CO<sub>2</sub> atmosférico**. Em cenários de transição energética tão restritivos, como é o caso do cenário NetZero, toda a emissão de GEE que não consegue ser zerada até 2050. Assim sendo, é necessário ser compensada por emissões negativas através de diferentes meios para que se chegue à neutralidade climática. Entre diversas opções de compensação estão a recuperação de pastagens degradadas, o reflorestamento, a compra de créditos de carbono e os processos de captura e armazenamento de carbono (carbon capture and storage – CCS). O CCS pode ser aplicado em diversos processos produtivos, como em alguns setores industriais, e em processos de produção de biocombustíveis avançados.

Dessa forma, a opção pela utilização desses biocombustíveis lignocelulósicos está atrelada à possibilidade de instalação de equipamentos de captura de carbono, para que o CO<sub>2</sub> liberado no exausto desses processos seja armazenado em reservatórios geológicos e não seja devolvido à atmosfera. Exemplos de biomassa que podem ser utilizadas para a produção de biocombustíveis são o eucalipto ou pinus, que capturam grandes quantidades de CO<sub>2</sub> atmosférico durante o seu processo de desenvolvimento, sendo parte armazenada no solo e parte no seu material celular. Posteriormente, durante o processo de fabricação do biocombustível, parte do CO<sub>2</sub> da síntese é capturado e armazenado, o que chamamos de BECCS (do inglês *BioEnergy with Carbon Capture and Storage*, uma especificação de CCS quando associado ao uso de biomassa).

<sup>12</sup>Ver a seção “3.3 Setor de transportes”

Sendo assim, pode-se considerar que **há uma remoção líquida de CO<sub>2</sub> da atmosfera**, uma vez que o CO<sub>2</sub> capturado no crescimento das árvores de pinus e eucalipto não será devolvido à atmosfera, mas sim armazenado permanentemente em reservatórios geológicos.

Assim a produção de biocombustíveis passa a ter grande importância na captura de carbono. Isso é demonstrado pelo salto da participação do BECCS que segundo resultados da modelagem, passa a capturar 245,4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> em 2050 no cenário NetZero.

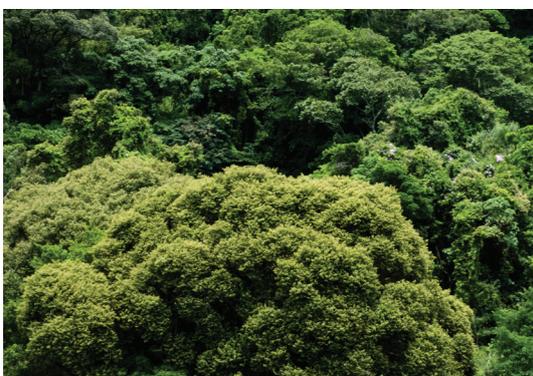
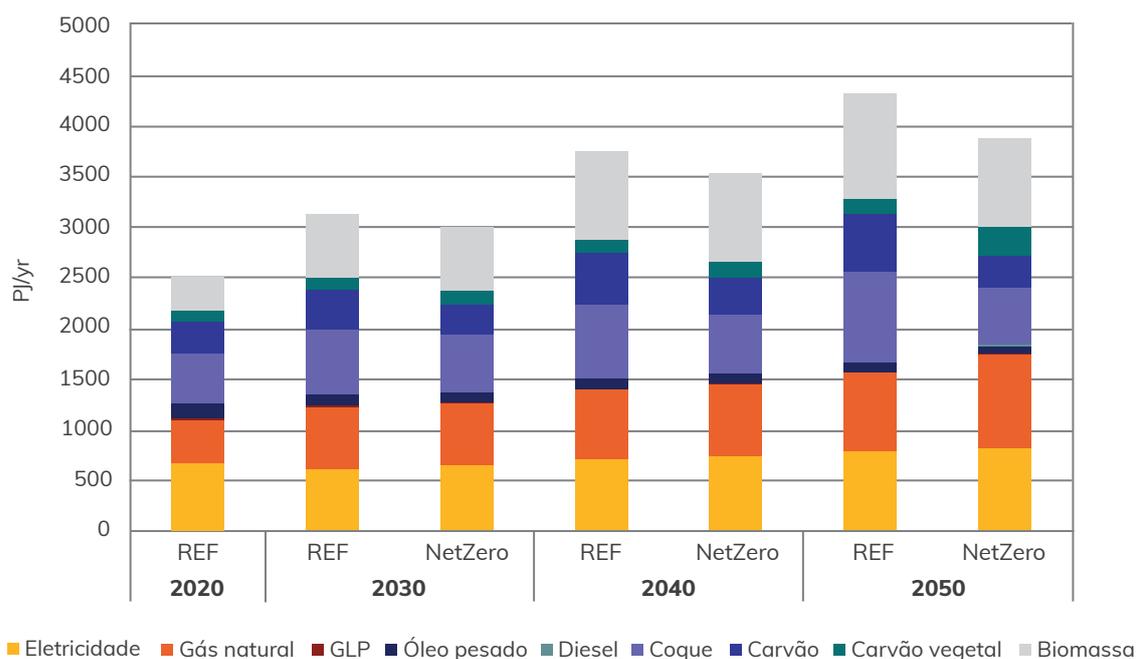


Foto: tree in the forest | Adobe Stock

## Setor industrial

No modelo BLUES, o setor industrial é composto por 11 segmentos industriais destacados no Balanço Energético Nacional (BEN), da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), como os segmentos mais energointensivos, ou seja, os que mais consomem energia. São eles: cimento, cerâmicas, setor químico, alimentos e bebidas, siderurgia, metalurgia, mineração, ferroligas, papel e celulose, têxtil e outros segmentos. A discretização espacial desse setor é nacional. Dessa forma, os resultados apresentados aqui representam o consumo total de energia na indústria, por tipo de fonte energética (**Figura 10**). O maior destaque entre os cenários é o aumento da utilização do **carvão vegetal** de origem renovável em substituição ao carvão mineral de origem fóssil, na indústria siderúrgica no cenário NetZero. O aumento do uso da biomassa em 2050 nos dois cenários analisados também é significativo para a indústria. Além disso, de forma geral, há uma maior **eletrificação**, bem como a aplicação de medidas de **eficientização** em fornos, caldeiras e diversos processos produtivos.

**Figura 10.** Consumo energético na indústria para o Brasil, para os cenários REF e NetZero



Nota: Petajoule (PJ) é a unidade de energia correspondente a 1 quatrilhão de Joules (10<sup>15</sup>J). Para mais informações, consultar a descrição dos termos no glossário (**Anexo A**). Fonte: Elaboração própria



Foto: Michael Fousert | Unplash

## Setor de transportes

A necessidade de redução do consumo de combustíveis fósseis no Brasil afeta diretamente o setor de transportes, que junto com a indústria, são os maiores setores consumidores de energia no país, responsáveis por 31% e 32% do consumo total nacional, respectivamente (EPE, 2021). Além disso, os combustíveis fósseis, como o diesel, gasolina, gás natural e o querosene de aviação, são atualmente predominantes no setor de transportes, representando 75% dos combustíveis utilizados, em 2020, frente aos 25% de combustíveis renováveis, como o etanol anidro e hidratado e o biodiesel (EPE, 2021).

Dessa forma, a modelagem integrada indica duas estratégias para descarbonizar o setor de transportes:

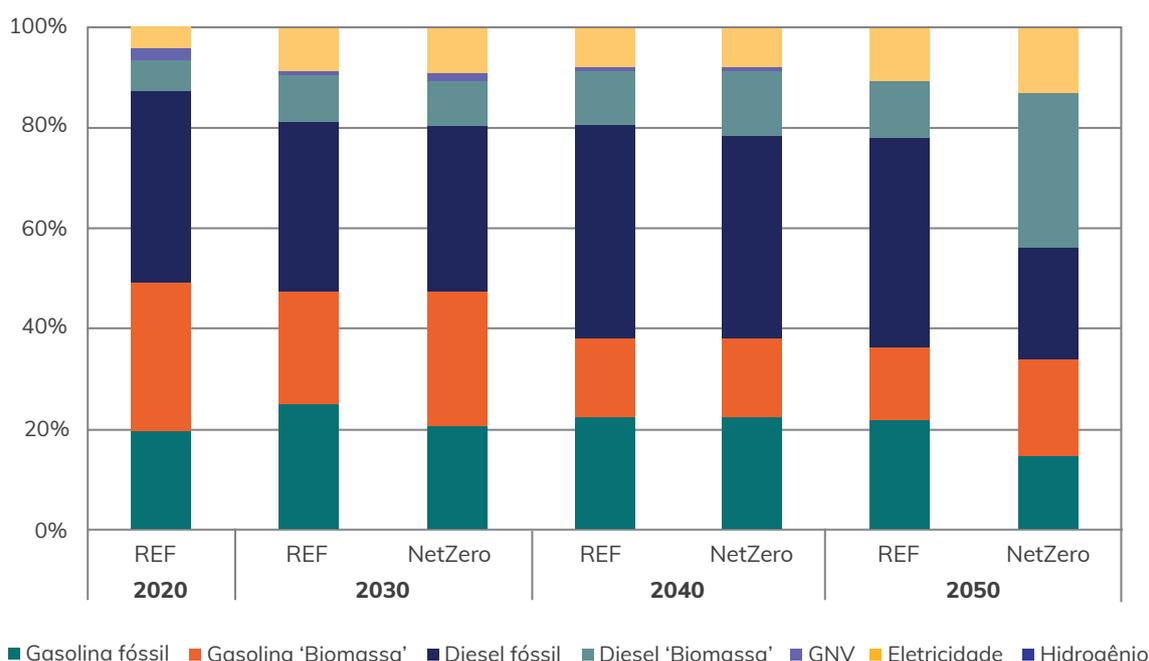
**(i) substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis com o intuito de utilizá-los, sobretudo, em veículos pesados; e (ii) eletrificação progressiva de veículos leves.**

A eletrificação é vista como uma possibilidade de descarbonização de veículos leves, como motocicletas, automóveis e comerciais leves. Usualmente, esses veículos percorrem menores distâncias em meios urbanos e são usados por menos tempo durante o dia, o que os caracteriza como veículos mais facilmente adaptados à rotina de

carregamento das baterias. Por outro lado, veículos pesados, sobretudo os caminhões, enfrentam mais desafios com relação à eletrificação, uma vez que percorrem longas distâncias para o transporte de cargas e por isso, dificultam a logística de carregamento dessa frota. No entanto, a descarbonização de veículos pesados, como ônibus, caminhões, aeronaves e embarcações marítimas, poderia vir da utilização de biocombustíveis celulósicos com superior prontidão tecnológica, produzidos a partir de biomassa, conforme descrito na seção anterior.

Sendo assim, a **Figura 11** mostra na participação dos diferentes combustíveis para o transporte de passageiro rodoviário. Em 2050 no cenário NetZero, praticamente todo o diesel e gasolina utilizados no modal rodoviário viriam a partir da biomassa - entrada de biocombustíveis avançados -, e apenas uma pequena fração ainda seria derivada do petróleo ("Gasolina Fóssil"). Há também uma entrada de veículos elétricos ao longo do tempo, alcançando uma participação de 10% e 13% em 2050, no cenário REF e NetZero, respectivamente. Esse percentual de eletrificação é justificado no caso brasileiro pela maturidade da indústria de biocombustíveis, o que faz com que opção por eletrificação da frota não se apresente como a de menor custo.

**Figura 11.** Participação dos combustíveis por km percorrido de passageiro rodoviário no setor de transportes rodoviário, no Brasil, para os cenários REF e NetZero



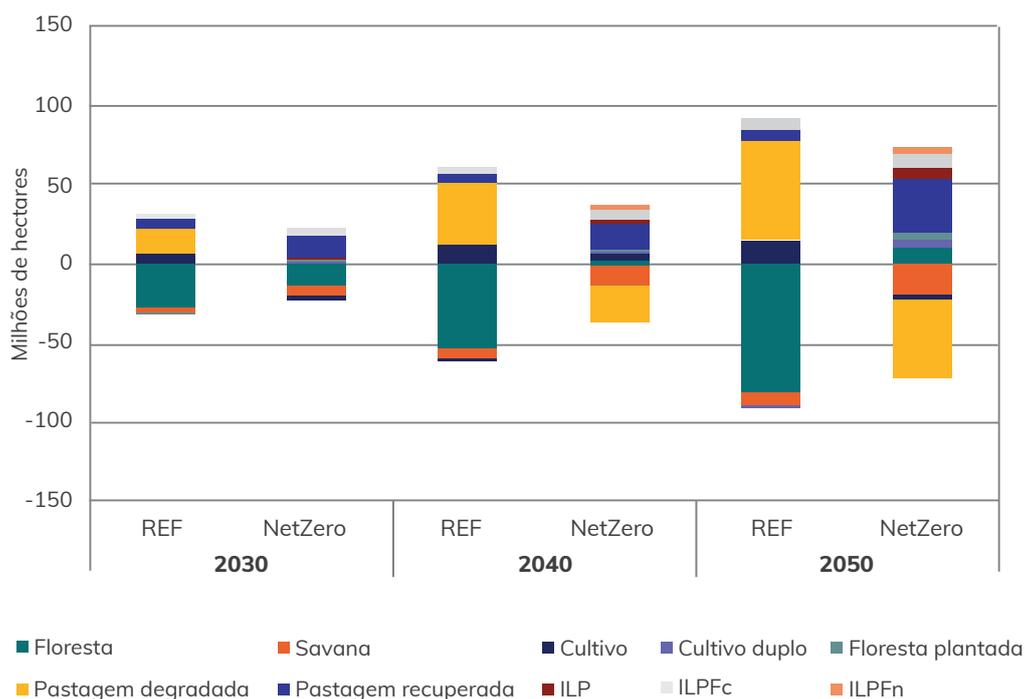
Nota: GNV = gás natural veicular. Para mais informações, consultar a descrição dos termos no glossário (Anexo A). Fonte: Elaboração própria

## Setor de Agropecuária, Florestas e Outros Usos do Solo (AFOLU)

A agropecuária é observada pelo modelo BLUES como parte do setor de AFOLU que engloba tanto a mudança de coberturas de vegetação (mudança de uso do solo), quanto a parte de implementação de diferentes tipos de meios de produção agropecuária (uso do solo). Esse setor possui diferentes tipos de mecanismos de produção com ou sem medidas de mitigação climática que se diferenciam entre cada região brasileira, visto que cada uma possui especificidades pontuais como condições edafoclimáticas e níveis de mão-de-obra distintos.

O papel da recuperação das pastagens degradadas e conservação de florestas nativas é preponderante no cenário NetZero ao longo do período analisado (Figura 12). Esse processo de recuperação ocorre devido à possibilidade de estocagem de carbono abaixo do solo em pastagens recuperadas (ou também chamadas de pastagens de boa qualidade) com baixo custo de investimento e manutenção desse tipo de pastagens. Ademais, a pastagem recuperada propicia condições adequadas para a alimentação dos animais, que passam a consumir um material de melhor qualidade nutricional e, conseqüentemente, a ter uma “taxa de engorda” maior, gerando lucro para o produtor rural em um menor tempo. Essa **diminuição de áreas de solo degradada é importante para reduzir as pressões sobre áreas de vegetação natural** advindas da necessidade de expansão de terras agricultáveis para a produção de biocombustíveis no cenário NetZero.

**Figura 12.** Mudança cumulativa no uso do solo no Brasil, para os cenários REF e NetZero (ano base = 2020)



Nota: ILP = Integração Lavoura-Pecuária; ILPFc = Intregração Lavoura-Pecuária-Floresta comercial; ILPFn = Integração Lavoura-Pecuária-Floresta nativa. Para mais informações, consultar a descrição dos termos no glossário (Anexo A). Fonte: Elaboração própria

Além disso, entre os cenários REF e NetZero é possível observar um **crescimento de aproximadamente 3,6 milhões de hectares de florestas plantadas** (eucalipto e pinus) no Brasil em 2050. Essa expansão se deve principalmente à demanda por biomassa para a produção de biocombustíveis celulósicos a partir da rota BTL (*biomass-to-liquids*), para a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis associados à CCS como é o caso do querosene biocombustível e o diesel biocombustível.

Dessa forma, as florestas plantadas são uma boa fonte de biomassa devido ao seu baixo custo de produção e a grandes taxas de captura de carbono durante o processo de desenvolvimento vegetativo até a colheita. Assim, florestas plantadas de eucalipto ou pinus capturam quantidades significativas

de CO<sub>2</sub> atmosférico durante o processo de desenvolvimento, sendo parte armazenada abaixo do solo e parte no material celular. Posteriormente, durante o processo de fabricação do biocombustível, o CO<sub>2</sub> de processo é capturado e armazenado em reservatórios geológicos, fazendo assim o denominado BECCS, já comentado anteriormente. O modelo aponta esse tipo de processo de composição de bioinsumos para a produção de bioenergéticos associados ao CCS visto que ele é o único meio que permite o modelo obter **emissões negativas** de carbono devido justamente à etapa agrícola. Enquanto isso, a associação de CCS a fontes fósseis permite no máximo emissões ligeiramente positivas, devido aos limiares técnicos da eficiência de captura do gás carbônico nos processos industriais.

Ademais, outro ponto de destaque no nível nacional é o aumento da participação de **sistemas integrados (ILP) e agroflorestais (ILPFc e ILPFn)**, em 2050, que passou de 7,0 milhões de hectares no cenário REF para cerca de **18,3 milhões de hectares no cenário NetZero**. Esse tipo de sistema é importante visto que ele permite a implementação de diferentes cultivos e criações em um mesmo território. Assim, aumenta a biodiversidade local e diminui a necessidade de insumos químicos, devido às rotações das culturas e criações ao longo do ano. Além disso, quando o sistema é associado com a produção florestal, a presença das árvores resulta em melhores condições de conforto térmico animal, reduzindo a necessidade hídrica dos bovinos.

Um ponto a se destacar é que o modelo BLUES conta com dois tipos distintos de sistemas integrados, um sem a adição do fator florestal e outro com o fator florestal por meio da implementação de florestas plantadas (também conhecido como sistema agroflorestal). O BLUES aponta justamente o sistema agroflorestal para mitigação climática devido à **estocagem de carbono abaixo e acima do solo e à integração dessas florestas plantadas à cadeia de produção de biocombustíveis avançados**.

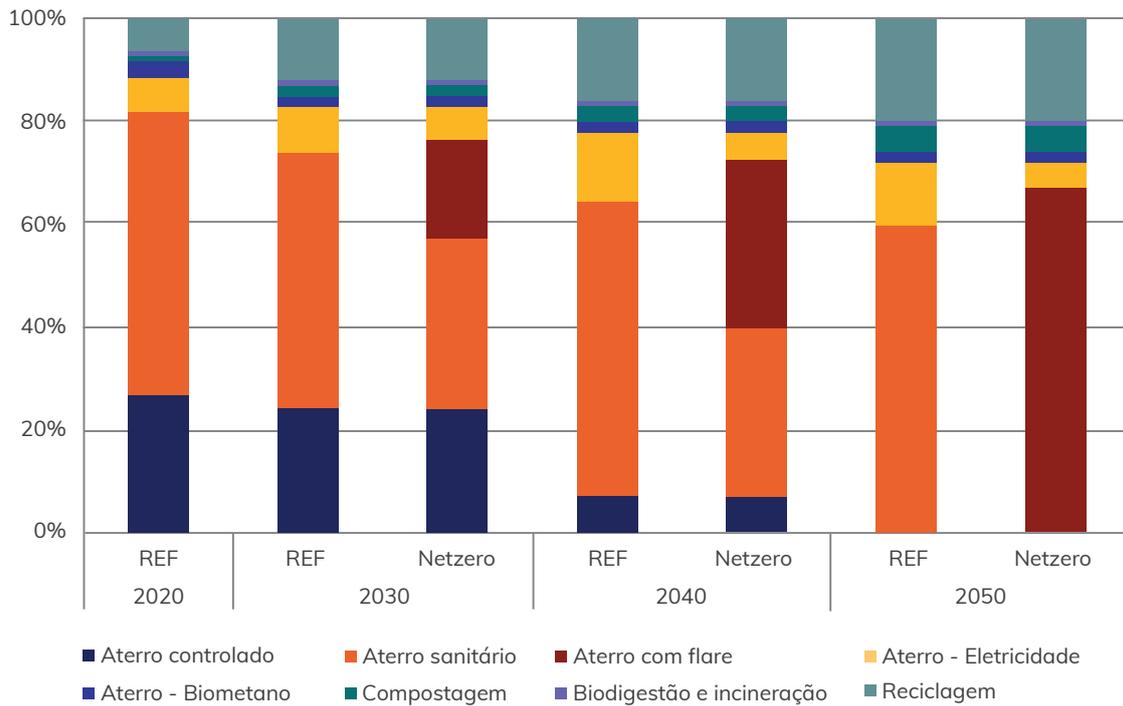
## Setor de resíduos

No BLUES, o setor de resíduos abrange o tratamento de efluentes, a incineração de resíduos sólidos hospitalares e o tratamento de resíduos sólidos urbanos. Ele está representado de maneira nacional. Quando comparado com os outros setores emissores de GEE, por exemplo, o setor de resíduos tem uma emissão relativamente pequena no Brasil.

Para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos, o modelo conta com diversas tecnologias de mitigação, que podem ser implementadas tanto nos aterros sanitários quanto fora deles. Nos aterros, pode ser implementada a queima em *flare* com geração de eletricidade e a produção de biometano. Fora deles, as alternativas são compostagem, biodigestão, incineração e reciclagem.

Quanto aos resultados da modelagem integrada, a **Figura 13** apresenta a participação de diferentes formas de tratamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil para os cenários REF e NetZero. Os resultados mostram a **implementação da queima em flare (Aterro com flare)** no cenário NetZero aumentando significativamente a sua participação ao longo do período, em detrimento ao uso de aterros sanitários e controlados, que chegam a zerar sua participação em 2050. A queima em *flare* consiste na queima do gás metano, evitando sua emissão, e incorrendo em uma emissão de CO<sub>2</sub>. É considerada uma opção de mitigação na medida em que se evita a emissão de um gás com alto poder de aquecimento global, como é o caso do metano, optando pela emissão de um gás com menor poder de aquecimento global, como é o caso do CO<sub>2</sub>.

**Figura 13.** Tratamento dos resíduos sólidos urbanos para o Brasil, no cenário REF e NetZero



Fonte: Elaboração própria

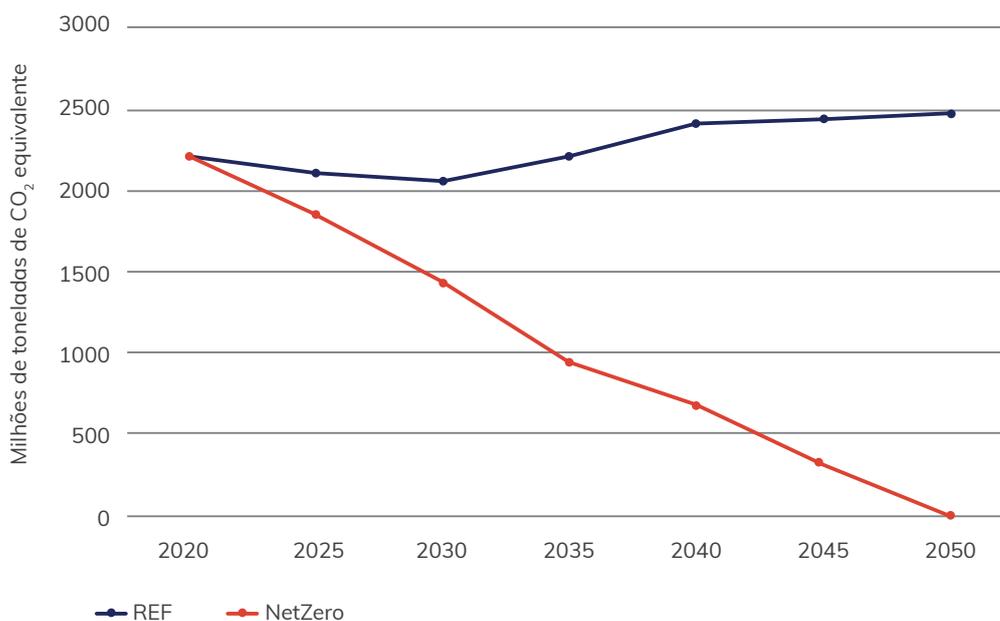
## Onde vamos chegar? A trajetória de emissões de GEE

As mudanças estruturais apresentadas para os setores de energia, transportes, AFOLU e resíduos são parte da transição energética necessária para se alcançar a neutralidade climática no Brasil. Como resultado de todo o esforço de mitigação que foi descrito ao longo do relatório, as emissões de GEE no país atingiriam a redução desejada. Com isso, **seriam evitadas aproximadamente 21 bilhões de toneladas acumuladas de CO<sub>2</sub> equivalente** entre 2020 e 2050, alcançando, deste.



Foto: Fernando | Adobe Stock

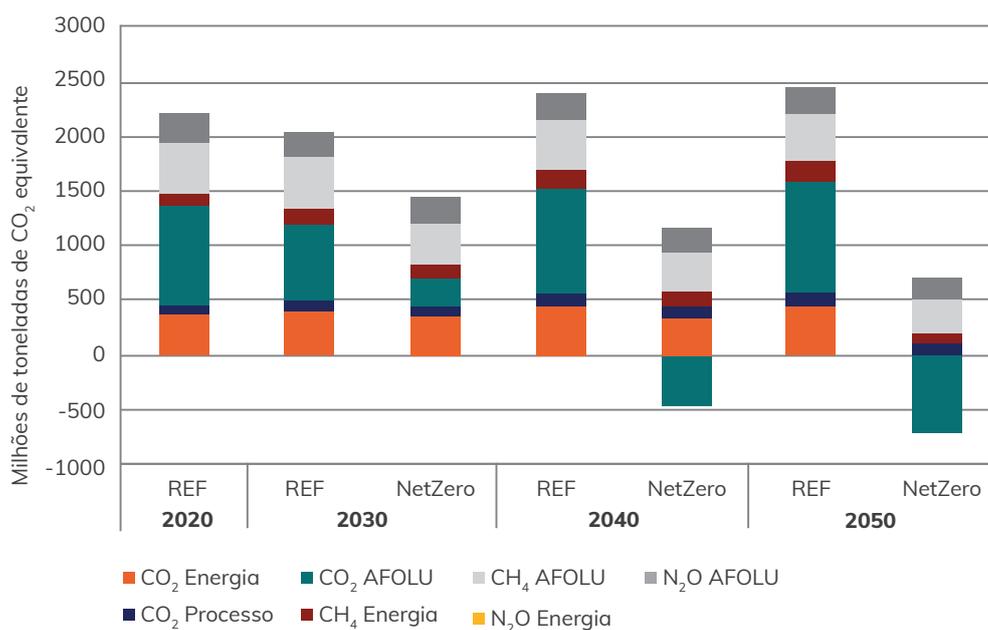
**Figura 14.** Emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil, para os cenários REF e NetZero



Fonte: Elaboração própria

A **Figura 15** traz um panorama geral de emissões por tipo de GEE emissor, considerando CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, para o cenário REF e NetZero. No ano base 2020 o CO<sub>2</sub> e o CH<sub>4</sub> do AFOLU se destacam como principais emissores, devido à elevada taxa de desmatamento e práticas de agropecuária insustentáveis. Já em 2050 no cenário NetZero destacam-se as emissões negativas de CO<sub>2</sub> do setor AFOLU que possibilitam a neutralidade climática, meta do cenário NetZero.

**Figura 15.** Emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil por tipo emissor, nos cenários REF e NetZero



Fonte: Elaboração própria

Por outro lado, a **Figura 16** traz um panorama setorial das emissões de GEE, considerando CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, para o cenário REF e NetZero. Destacam-se as emissões de **AFOLU como o setor mais emissor no país** durante todo o período de análise no cenário REF. Em 2030, espera-se o **fim do desmatamento total**, cumprindo as metas da NDC brasileira, o que reduz as emissões desse setor. Ainda assim, mantêm-se **emissões oriundas das atividades agropecuárias**. Para os outros setores, haveria um aumento das emissões no longo prazo no cenário de políticas correntes.

Já o cenário NetZero da **Figura 16** apresenta um perfil de emissões bem diferente do cenário REF. **Para que a meta de emissões líquidas zero consiga ser alcançada em 2050, todos os setores são impactados de alguma forma, contribuindo de maneira distinta para a mitigação nacional.**

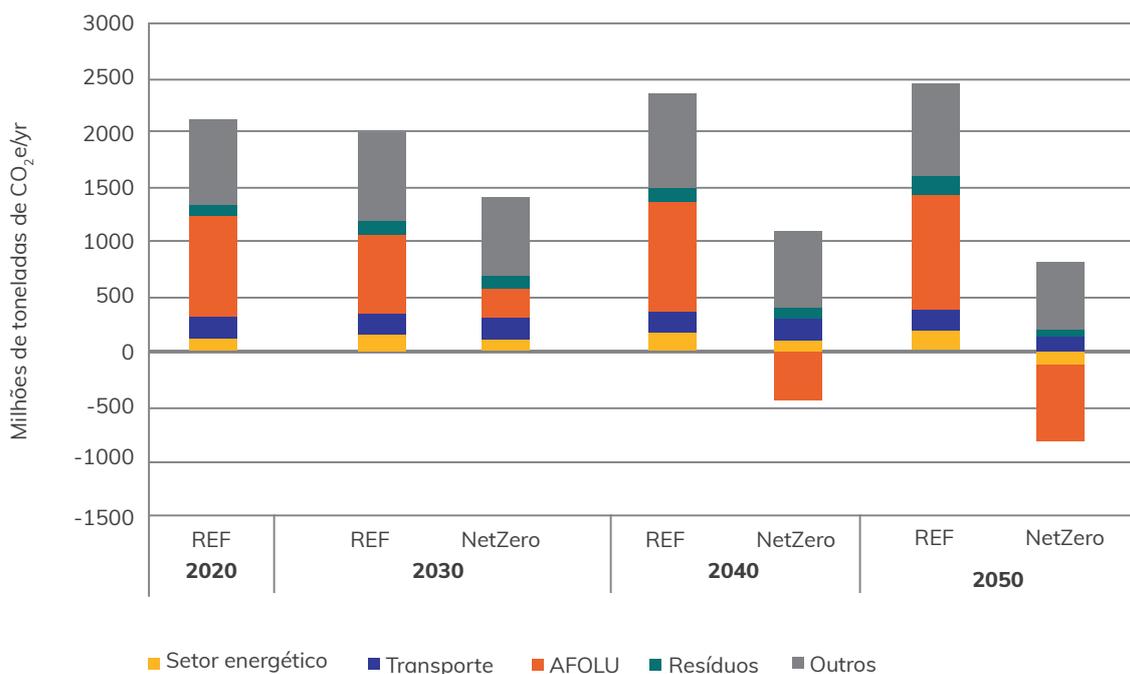
As maiores reduções absolutas ocorrem justamente no AFOLU, que implementa medidas de mitigação adicionais, além do cumprimento da NDC. Dentre as

principais medidas responsáveis pela redução de emissões no setor, estão a **recuperação de pastagens, as florestas plantadas e a implementação de sistemas integrados ou agroflorestais.**

O setor de transportes também merece destaque na redução absoluta de emissões, graças à substituição do diesel e querosene de aviação fósseis para combustíveis produzidos a partir da biomassa e à certa eletrificação da frota. Com isso, **o setor de transportes se aproxima da neutralidade de emissões em 2050.**

O setor energético é o único setor que alcança emissões neutras, indo além, com emissões negativas após 2035. **A captura e armazenamento de carbono instalados nos processos de produção de biocombustíveis avançados possibilita a estocagem do CO<sub>2</sub>, fundamental para a neutralidade climática em 2050.** Dessa forma, as emissões líquidas negativas do setor energético compensam as emissões positivas dos demais setores, que não alcançam a neutralidade de emissões.

**Figura 16.** Emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil por setor, nos cenários REF e NetZero



Nota: Outros = não considerados nos setores discriminados. Fonte: Elaboração própria

# Referências Bibliográficas

CARVALHO, F. M. de. "Evaluation of the Brazilian potential for producing aviation biofuels through consolidated routes", p. 137, 2017.

BOUCKAERT, S., PALES, A. F., MCGLADE, C., et al. Net Zero by 2050 A Roadmap for the global energy sector. [S.l: s.n.], 2021.

EPE, 2021. Balanço Energético Nacional 2021. Rio de Janeiro, RJ, Empresa de Pesquisa Energética.

FEBRABAN (2020), Comunicação pessoal, 14/10/2021, Diretoria de Economia, Regulação Prudencial e Riscos.

FMI/WEO, 2020. World Economic Outlook – October 2020. <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2020/09/30/world-economic-outlook-october-2020>.

IEA. World Energy Outlook 2019. International Energy Agency. 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>.

IEA. Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy. 2021. International Energy Agency

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

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, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.

IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

KÖBERLE, A. Implementation of Land Use in an Energy System Model to Study the Long-Term Impacts of Bioenergy in Brazil and its Sensitivity to the Choice of Agricultural Greenhouse Gas Emission Factors. 2018. 135 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MCTI, 2017. Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente. Disponível em: [https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/opcoes\\_mitigacao/Opcoes\\_de\\_Mitigacao\\_de\\_Emissoes\\_de\\_Gases\\_de\\_Efeito\\_Estufa\\_GEE\\_em\\_SetoresChave\\_do\\_Brasil.html](https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/opcoes_mitigacao/Opcoes_de_Mitigacao_de_Emissoes_de_Gases_de_Efeito_Estufa_GEE_em_SetoresChave_do_Brasil.html).

RIahi, K., VAN VUUREN, D.P., KRIEGLER, E., EDMONDS, J., O'NEILL, B.C., FUJIMORI, S., et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. Glob Environ Chang 2017; 42:153–68. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

ROCHEDO, P. R. R., SOARES-FILHO, B., SCHAEFFER, R., et al. "The threat of political bargaining to climate mitigation in Brazil", Nature Climate Change, v. 8, n. 8, p. 695–698, 9 ago. 2018. DOI: 10.1038/s41558-018-0213-y. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/s41558-018-0213-y>.

TAGOMORI, I. "Potencial Técnico e Econômico para a Produção de Fischer-Tropsch Diesel a partir de Biomassa (FT-BTL) Associada à Captura de Carbono no Brasil", v. 102, n. 4, p. 24–25, 2017. DOI: 10.1002/ejsp.2570.

## Coordenação

Prof. Roberto Schaeffer

Prof. Alexandre Szklo

Prof. André F. P. Lucena

Prof. Pedro R. R. Rochedo

Profa. Joana Portugal-Pereira

## Equipe

Talita Cruz

Mariana Império

Luiz Bernardo Baptista

Gerd Angelkorte

Eveline Arroyo

Realização:



Facilitação:



Com o apoio de:



[www.ukpact.co.uk](http://www.ukpact.co.uk)

# Anexo A

## Glossário

**Tabela 2.** Tecnologias e suas definições

Tecnologia	Definição
BECCS	<p>Há, ainda, a bioenergia associada a sistemas de captura, transporte e estocagem de carbono, ou BECCS (sigla para <i>BioEnergy with Carbon Capture and Storage</i>, em inglês). A diferença entre o CCS e o BECCS está na fonte utilizada na combustão. No caso do BECCS, as fontes são renováveis, como biomassas diversas (resíduos, pinus, eucalipto, bagaço de cana-de-açúcar). O CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) absorvido no ciclo de crescimento da biomassa é capturado no processo de conversão dessa biomassa em bioenergia, impedindo que o CO<sub>2</sub> absorvido pela planta volte para a atmosfera. Assim, ao incorporar a etapa de captura, considera-se que o sistema é capaz de "remover o CO<sub>2</sub> da atmosfera", ou prover emissões líquidas negativas, uma vez que o CO<sub>2</sub> absorvido pela planta é capturado. Exemplos de BECCS incluem a captura do carbono emitido durante a etapa de fermentação da cana-de-açúcar para produção de etanol, durante a combustão da biomassa para geração de eletricidade, durante a produção de biocombustíveis avançados, entre outros. No entanto, esta é ainda uma tecnologia em desenvolvimento, com poucos projetos em operação ao redor do mundo.</p>
Biodiesel	<p>O biodiesel é uma forma de combustível diesel derivado de plantas ou animais e consiste em ésteres de ácidos graxos de cadeia longa. É normalmente feito reagindo quimicamente com lipídios, como gordura animal (sebo), óleo de soja ou algum outro óleo vegetal com um álcool, produzindo um éster metílico, etílico ou propílico.</p>

Fonte: Elaboração própria

[CONTINUA](#)



CCS	Captura e armazenamento de carbono (CCS) é o processo de capturar e armazenar dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), impedindo que ele seja liberado na atmosfera. Pode ser utilizado em usinas termelétricas para geração de eletricidade, por exemplo, visando a redução das emissões. Além da captura, deve ser considerado o transporte e o armazenamento ou uso do gás capturado.
CSP	Energia solar concentrada ou heliotérmica (do termo em inglês, <i>Concentrated Solar Power</i> – CSP), representa o conjunto de tecnologias que geram eletricidade e/ou calor através da conversão de energia solar concentrada. Esta energia solar é concentrada a partir de lentes ou espelhos e também pode ser usada para uma variedade de aplicações industriais, como dessalinização de água, óleo aprimorado recuperação, processamento de alimentos, produção química e processamento de minerais.
Etanol 1ª Geração	O etanol é produzido através da fermentação de açúcares (glicose, principalmente) usando cepas de leveduras. As principais matérias-primas do etanol de primeira geração são a cana de açúcar e o milho.
Etanol 2ª Geração	O etanol de segunda geração, diferentemente do etanol de primeira geração, é produzido a partir de açúcares extraídos da celulose da biomassa, como na palha e no bagaço da cana-de-açúcar.
Etanol BECCS	Durante a fermentação do etanol, os açúcares das matérias-primas convencionais para biocombustíveis são fermentados em etanol e CO <sub>2</sub> . Dois terços do carbono contido nos açúcares acabam no etanol; o terço restante forma CO <sub>2</sub> quase puro. A corrente de CO <sub>2</sub> pode então ser separada por meio de uma separação gás-líquido, enquanto a mistura de etanol/água é normalmente separada por destilação.

Fonte: Elaboração própria

[CONTINUA](#)



Bioquerosene (HEFA)	Os bioóleos podem ser convertidos em combustíveis <i>biojet</i> por meio de três vias: hidroprocessamento, conhecido como jato renovável hidrotratado (HRJ) ou Ésteres e ácidos graxos hidrotratados (HEFA); Hidrotermólise catalítica e pirólise rápida, conhecida como Jato Celulósico Despolimerizado Hidrotratado (HDCJ). Os processos HEFA usam matérias-primas baseadas em triglicerídeos, mas os ácidos graxos livres (FFAs) são produzidos de forma diferente por clivagem de glicerídeos por propano e por hidrólise térmica, respectivamente. O bio-óleo usado na via HDCJ é obtido por pirólise da matéria-prima de biomassa. Até agora, apenas a via HEFA foi aprovada para mistura e tem uma especificação definida pela ASTM.
Bioquerosene (BTL)	A rota da Biomassa para Líquido (BTL) que compreende tecnologias bioquímicas e termoquímicas é considerada uma das principais alternativas verdes para a produção de produtos químicos de base biológica, combustíveis e energia. Dentre esses produtos, um dos combustíveis líquidos que vem recebendo muita atenção é o substituto do combustível convencional para aviação, denominado combustível renovável para aviação ou simplesmente <i>biojet</i> .
Diesel biocombustível (BTL)	O termo Biomassa para Líquido (BTL) é aplicado a combustíveis sintéticos feitos de biomassa por meio de uma rota termoquímica. O objetivo é produzir componentes de combustível que sejam semelhantes aos da atual gasolina de origem fóssil (gasolina) e combustíveis diesel e, portanto, podem ser usados em sistemas de distribuição de combustível existentes e com motores padrão.
Diesel biocombustível (BTL) CCS	As usinas de combustível FT oferecem uma oportunidade única para captura e armazenamento de carbono (CCS). O gás de síntese é removido do CO <sub>2</sub> durante a limpeza do gás para aumentar a pressão parcial dos reagentes na seção FT. O fluxo resultante de CO <sub>2</sub> quase puro do processo da unidade Selexol é facilmente capturado para o armazenamento de carbono, se desejado.

CONTINUA



FV	Energia solar fotovoltaica (FV) converte diretamente a energia solar em eletricidade a partir do efeito fotovoltaico. Podem ter base fixa ou eixos móveis, responsáveis por um maior aproveitamento da energia solar durante o ano. Há, ainda, a instalação de módulos flutuantes sobre corpos hídricos.
GD	A Geração Distribuída (GD) é o termo usado para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es), onde o consumidor pode gerar sua própria eletricidade a partir de fontes renováveis ou cogeração.

Fonte: Elaboração própria

# Anexo B

## Estrutura da Modelagem Integrada

### Conjunto de Modelos de Avaliação Integrada do Cenergia

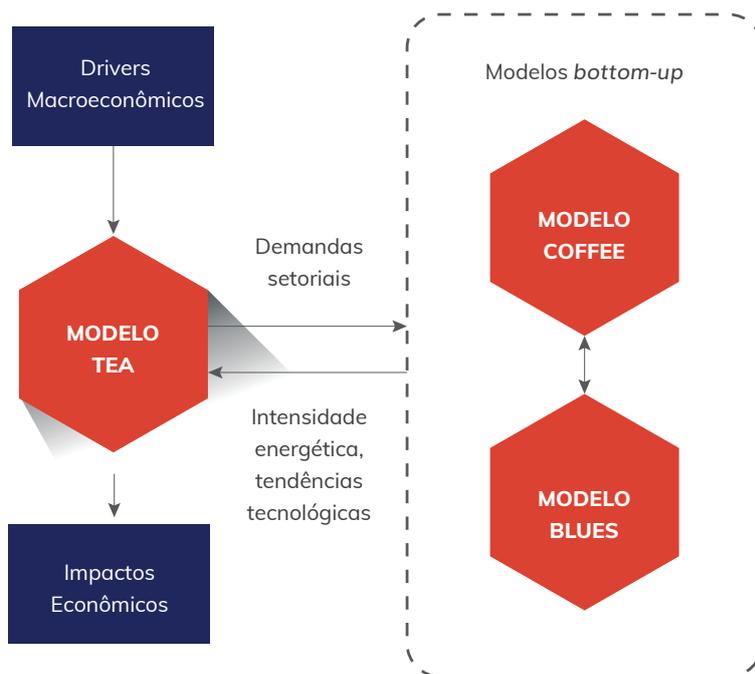
O procedimento metodológico faz uso do conjunto de modelos que vêm sendo desenvolvidos no laboratório Cenergia, da COPPE/UFRJ, ao longo dos últimos vinte anos, no seio de uma equipe multidisciplinar com experiência de atuação nas áreas de engenharia, economia e política pública. Esses modelos, chamados de Modelos de Avaliação Integrada (*Integrated Assessment Models* – IAMs) trazem representações dos sistemas energético, de uso do solo, recursos hídricos e impactos ambientais que são utilizadas para a construção de cenários de médio-longo prazo diante de premissas socioeconômicas, tecnológicas, de políticas públicas, e ambientais. IAMs são ferramentas frequentemente utilizadas por grupos de pesquisa internacionais e pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*) para definir cenários de transição para um mundo de baixo carbono, considerando as interações entre os diferentes setores econômicos, emissões de gases de efeito estufa (GEE) e suas consequências para o clima global.

Conforme descrito a seguir, três IAMs desenvolvidos no Cenergia/COPPE são usados em conjunto para a realização de cenários de longo prazo.

- **COFFEE (Computable Framework For Energy and the Environment):** modelo de otimização *bottom-up* com extenso detalhamento tecnológico dos sistemas energético e de uso do solo em escala global, usado para avaliação de estratégias globais e regionais de mitigação e desenvolvimento tecnológico. Divide o mundo em 18 regiões.
- **BLUES (Brazilian Land-Use and Energy System):** modelo de otimização nacional *bottom-up*, que descreve em maior detalhe tecnologias convencionais e de mitigação, investimentos e custos de operação e manutenção dos setores de energia, uso da terra e uso da água, em cinco regiões brasileiras. Ele será melhor explicado na sequência.
- **TEA (Total-Economy Assessment):** modelo global de equilíbrio geral computável (*Computable General Equilibrium* – CGE), que simula o funcionamento da economia através da análise simultânea das interações existentes entre regiões, setores e agentes econômicos. Divide o mundo nas mesmas 18 regiões que o modelo COFFEE e possui representação mais detalhada dos setores agropecuário e energético, além do comércio internacional.

Esse conjunto de modelos interage de forma a construir cenários e capturar estratégias para o alcance de metas de descarbonização e outras políticas ambientais. O uso de diferentes modelos permite captar elementos que são melhor analisados conforme o tipo de metodologia (equilíbrio geral computável ou tecnológico) e nível de detalhamento (nacional ou global). O processo de integração entre os modelos é um processo contínuo de aprimoramento e de troca de informações, conforme representado pela **Figura 17**.

**Figura 17.** Troca de informações entre modelos de avaliação integrada



Fonte: Elaboração própria

O fluxo de informações e dados tem início com a definição dos cenários macroeconômicos e seus principais drivers, tais como taxas de crescimento da população e do PIB. A partir dos *drivers* macroeconômicos, inicia-se um processo de troca de informações e interações entre o modelo econômico de equilíbrio geral (TEA) e os modelos tecnológicos global (COFFEE) e nacional (BLUES).

Por um lado, os modelos COFFEE e BLUES fornecem informações sobre a evolução e sobre a penetração de diferentes tecnologias e de mudanças no uso da terra, bem como sobre a evolução da intensidade energética setorial, representada pela relação entre o uso de energia e o nível de atividade dos setores ao longo do horizonte de análise. Por serem modelos com alto grau de detalhamento tecnológico, é possível depreender em detalhe os efeitos de políticas (ex. políticas climáticas), de curva de aprendizagem, e de interação setorial entre os diferentes segmentos dos setores de energia e de uso da terra.

Pelo lado da análise econômica, o modelo de equilíbrio geral (TEA) provê a evolução da demanda final por bens e serviços, para cada setor, das diferentes regiões no mundo – que servem de dados de entrada para o modelo COFFEE<sup>13</sup>. Posteriormente, o modelo mundial (COFFEE) fornece as demandas ao modelo nacional (BLUES), assim como o limite de emissões acumuladas disponíveis para o país em 2050, conforme diferentes cenários de governança climática. A demanda, por sua vez, afeta a evolução dos sistemas energéticos e de uso da terra, alterando a decisão ótima destes modelos, o que leva a um processo iterativo que se encerra quando há convergência entre as trajetórias setoriais. Por fim, como resultado, obtém-se os impactos econômicos sobre o nível de atividade (PIB), bem como sobre a evolução do investimento, e da produtividade do capital e trabalho.

<sup>13</sup>Ressalta-se que as demandas do setor energético nos modelos COFFEE e BLUES são demandas por serviços energéticos, em que o modelo é livre para escolher o portfólio de fontes finais de energia que podem atender a essas demandas através de diferentes tecnologias de uso final de energia (veículos, plantas termelétricas, caldeiras industriais, aquecedores de água residenciais etc.). No caso do módulo de uso do solo, as demandas são por produtos agropecuários, considerando os mercados interno e externo fornecidos pelo modelo TEA.

Assim sendo, os modelos integrados TEA-COFFEE fornecerão as variáveis de contorno sobre as demandas internas e sobre o comércio internacional nos sistemas energético e agropecuário, de acordo com cada cenário representativo de transição mundial de baixo carbono. Tais variáveis de contorno serão utilizadas como dados de entrada do modelo de energia e uso do solo nacional (BLUES) para avaliar os impactos específicos nos setores elétrico (matriz elétrica e eletrificação do transporte), O&G (produção, refino), biocombustíveis e agropecuário (*commodities*, alimentos).

O uso do modelo BLUES se faz necessário devido ao seu maior grau de detalhamento tecnológico, fornecendo uma representação mais precisa dos sistemas energético e de uso do solo para 5 regiões brasileiras. Apesar de compartilhar o mesmo procedimento metodológico do modelo COFFEE, o modelo BLUES é mais bem qualificado para responder a questões de escopo nacional/regional, enquanto o modelo COFFEE permite responder questões globais e transnacionais.

## Framework de modelagem elaborado para o Plano de Descarbonização de Minas Gerais

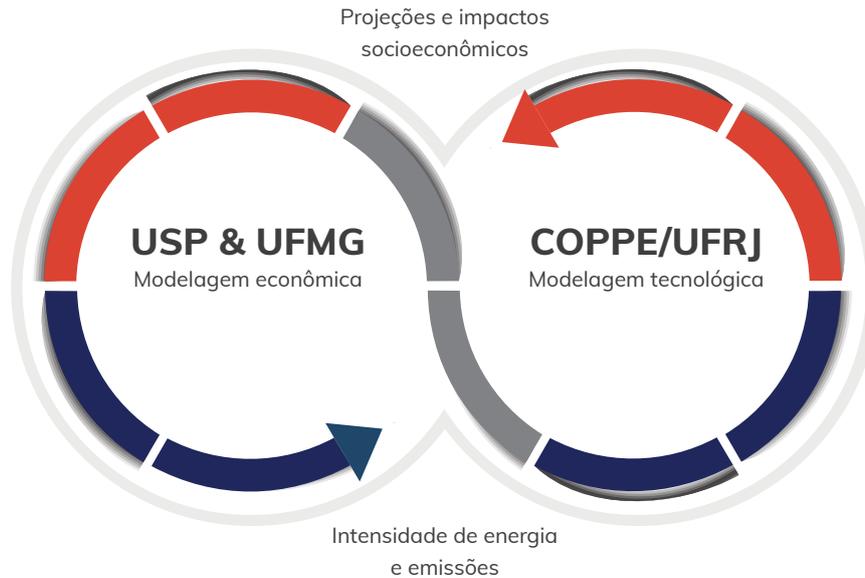
A subseção anterior detalhou como os modelos do Cenergia/COPPE são elaborados e como interagem entre si. Devido à troca de informações entre eles, não é possível separar completamente a elaboração de um modelo em relação a outro. No entanto, dependendo do tipo de análise que se deseja fazer, o modelo mais indicado é escolhido, levando em conta suas características e especificidades. Tal modelo é utilizado de forma independente. No caso da descarbonização de Minas Gerais, o modelo BLUES é o mais indicado para a análise, por ser o modelo nacional, com resultados para as cinco regiões brasileiras e possuir maior detalhamento tecnológico.

No entanto, a análise da região Sudeste que o BLUES alcança não é suficiente para a elaboração de um Plano de Descarbonização estadual. No processo de *downscaling* dos resultados, é necessário um modelo com maior discretização regional que consiga chegar no nível estadual. Dessa forma, esta modelagem faz uso de um esquema metodológico que integra um modelo econômico com resultados a nível estadual, ao modelo tecnológico BLUES. A modelagem econômica é feita pelo modelo EFES.

- **EFES (Economic Forecasting Equilibrium System):** modelo de Equilíbrio Geral Computável (CGE) nacional, cujo objetivo geral é a especificação e implementação de um sistema integrado de informação macroeconômicas, setoriais, projeção e análise de políticas econômicas. O framework do EFES permite a geração de resultados desagregados para 67 setores, consistentes com cenários macroeconômicos pré-estabelecidos (HADDAD; DOMINGUES, 2001) e produz resultados em nível Sudeste e Minas Gerais. Este modelo é desenvolvido pelos laboratórios NEREUS, ligado à Universidade de São Paulo (USP) e NEMEA, ligado à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

BLUES e EFES partem de um mesmo cenário econômico pré-estabelecido. As projeções de variáveis socioeconômicas auxiliam na elaboração das demandas setoriais de energia e agropecuária que devem ser atendidas pelo BLUES. Com esse dado, o BLUES processa, dentre as milhares de tecnologias setoriais presentes em sua base de dados, o conjunto com menor custo para atender a esta demanda, considerando as restrições desejadas de emissões de gases de efeito estufa (GEE) para o cenário avaliado. Esta informação de conjunto ótimo retorna então ao EFES na forma de valores de intensidade energética (consumo de energia/PIB) e de intensidade de emissões de GEE (emissões/PIB) sempre por setor. O EFES faz novas projeções socioeconômicas para os diferentes cenários apresentados. Tal relação é esquematizada na **Figura 18**.

**Figura 18.** Esquema metodológico de modelagem dos cenários de descarbonização



Fonte: Elaboração própria

## O modelo BLUES

O modelo MESSAGE foi desenvolvido originalmente no *International Institute for Applied System Analysis* (IIASA), na Áustria, para a otimização de um sistema energético (com suas demandas e suas ofertas) (Gritsevskiy & Nakicenov, 2000; IAEA, 2007). Atualmente, é utilizado por diversos grupos de pesquisa ao redor do mundo, sendo aplicado para setores energéticos há décadas, tanto para balanços de energia quanto para balanços de massa (Clarke *et al.*, 2014; Riahi *et al.*, 2014; Lucena *et al.*, 2015).

O princípio matemático do MESSAGE é a otimização de uma função-objetivo sujeita a um conjunto de restrições que definem a região viável que contém as soluções possíveis do problema (IAEA, 2007). O valor da função objetivo ajuda a escolher a melhor solução, de acordo com um critério específico, usualmente, a minimização do custo. Numa classificação mais geral, o MESSAGE é um modelo de programação inteira mista (permite que algumas variáveis sejam definidas como inteiras), utilizado para a otimização de um sistema de energia.

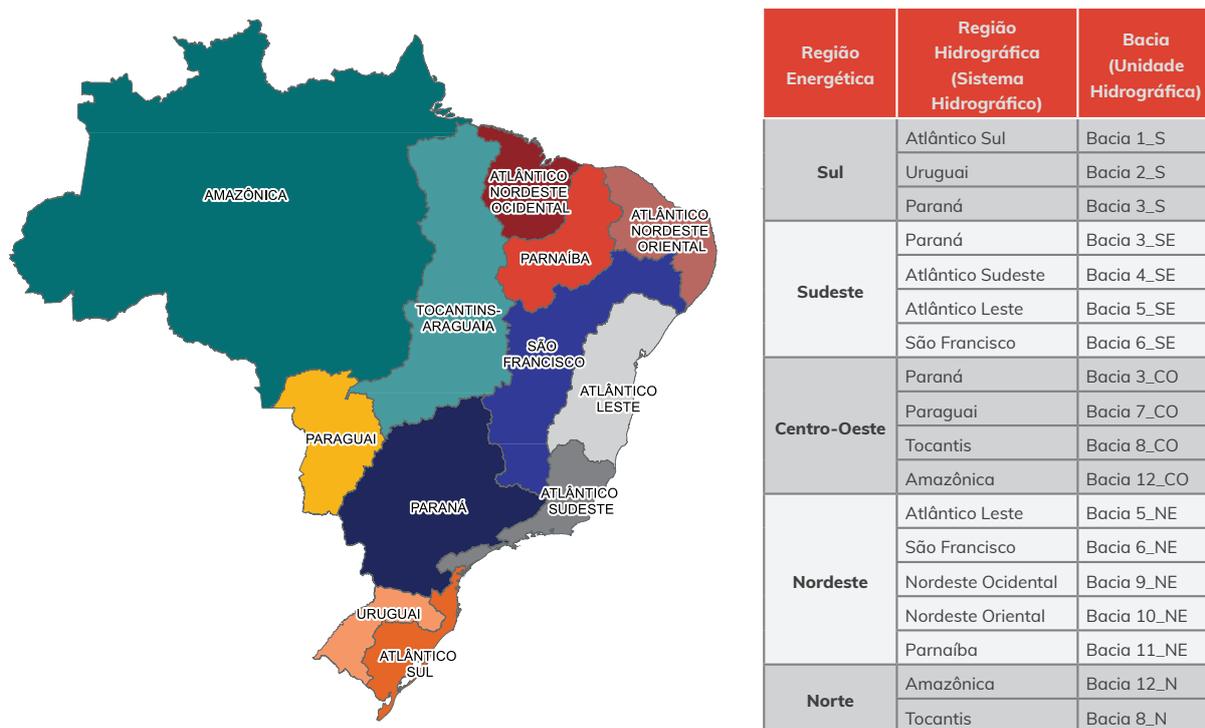
O modelo foi projetado para formular e avaliar alternativas de estratégias para o suprimento de energia, em consonância com restrições como limites de investimentos, disponibilidade e preço de combustíveis, regulação ambiental e taxas de penetração de mercado para novas tecnologias, dentre outras. Aspectos ambientais podem ser avaliados contabilizando-se e, se necessário, limitando-se as emissões de poluentes por diversas tecnologias em vários níveis da cadeia energética. Isso ajuda a avaliar o impacto de regulações ambientais no desenvolvimento do sistema energético.

Neste estudo, será utilizado o modelo BLUES (*Brazilian Land-Use and Energy System*). O BLUES é um modelo de otimização de mínimo custo para o Brasil, que foi construído na plataforma de geração de modelos MESSAGE (Modelo para Alternativas de Estratégia de Fornecimento de Energia e seus Impactos Ambientais Gerais). Os custos e características de desempenho (eficiências, fatores de capacidade, indicadores ambientais etc.) de alternativas tecnológicas estão entre os dados de entrada mais importantes para o modelo. Esses valores podem mudar ao longo da escala de tempo do modelo, o que o torna muito sensível a eles. Por exemplo, é possível representar redução de custos e melhoria de eficiência de tecnologias com o passar do tempo. Cada fonte de energia primária pode ser dividida em um número opcional de classes, levando em conta os custos de extração, a qualidade das fontes e a localização das reservas. Essas fontes primárias de energia são transformadas, direta ou indiretamente, em fontes de energia



Vásquez-Arroyo (2018) incorporou ao modelo BLUES um módulo de contabilização, restrição e precificação do uso de recursos hídricos pelo sistema energético. Na medida em que há diferenças na regionalização do setor energético (baseado nas macrorregiões políticas) e do setor de recursos hídricos (baseado nas macrorregiões hidrográficas), Vásquez-Arroyo (2018) propôs a compatibilização apresentada na **Figura 20**. Orosco (2020), por sua vez, desenvolveu um modelo com interface para os resultados do BLUES para análise integrada de recursos hídricos. Com esses módulos, o modelo BLUES permite avaliar de forma integrada as seguranças alimentar, energética e hídrica.

**Figura 20.** Compatibilização das regiões hidrográficas e energéticas no Modelo BLUES



Fonte: Vásquez-Arroyo (2018)

## Setor elétrico

O modelo BLUES tem um alto nível de detalhamento ao longo da cadeia de produção de eletricidade, desde a disponibilidade detalhada dos recursos energéticos nacionais (e importados), das tecnologias de geração elétrica, até as diferentes tecnologias de uso final. O detalhamento deste último nível permite, por exemplo, avaliar opções de eficiência energética, eletrificação de processos industriais e eletromobilidade. A **Tabela 3** a seguir apresenta as tecnologias de geração elétrica disponíveis no modelo BLUES, seus custos e parâmetros técnicos. No que diz respeito à representação das regiões brasileiras, as 5 regiões do BLUES são suficientes para permitir a análise dos intercâmbios elétricos entre as regiões, assim como do aproveitamento dos potenciais energéticos locais.

Além disso, o modelo conta com uma representação da curva de carga da demanda, assim como os perfis sazonal e diário de recursos energéticos renováveis, em especial hidrelétrico, eólico e solar. Isso permite avaliar o balanço de energia no nível horário, garantindo o equilíbrio entre oferta e demanda frente à variabilidade de fontes renováveis variáveis. Tal equilíbrio é, também, garantido por restrições e requisitos de integração de fontes intermitentes.

**Tabela 3. Parâmetros Técnicos e Econômicos das Tecnologias de Geração Elétrica no BLUES**

Power plant options	Investment cost (U\$/kW)		Variable O&M cost (U\$/MWh)		Fixed O&M cost (U\$/kW/year)		Conversion efficiency (%)		Availa- bility (%)
	2010	2050	2010	2050	2010	2050	2010	2050	0,85
Coal									
Domestic coal-FBC	3690	2500	4.6	3.1	39	26	0,38	0,42	0,85
FBC with CCS	4190	3000	8.1	6.2	91	78	0,22	0,34	0,85
Pulverized import. coal - PC	2000	2000	5.6	5.6	38	38	0,40	0,45	0,85
PC with CCS	2500	2500	9.1	9.1	90	90	0,35	0,36	0,85
IGCC (imported coal)	2400	2400	3.5	3.5	28	28	0,40	0,48	0,85
IGCC with CCS	2600	2600	7.1	7.1	54	54	0,35	0,42	0,85
Co-firing of domestic coal and biomass	3690	2500	4.6	3.1	39	26	0,35	0,40	0,85
Natural gas (NG)									
OCGT	800	600	3.5	3.5	20	15	0,35	0,38	0,90
CCGT	1190	1000	3.5	3.5	13	11	0,50	0,55	0,85
CCGT with CCS	3090	3090	3.5	3.5	23	23	0,43	0,43	0,85
Flexible CCGT	1300	1300	3.5	3.5	13	13	0,55	0,58	0,85
Hydroelectric									
Small hydroelectric (> 30 MW)	2936	2936	-	-	65	65	-	-	*
Medium hydro (>30 MW; < 300MW)	2513	2513	-	-	58	58	-	-	*
Large hydroelectric (> 300 MW)	2091	2091	-	-	52	52	-	-	*
Nuclear	4000	4000	0.8	0.8	136	136			
Biomass									
Bagasse with backpressure turbines (22 bar)	800	800	5.6	5.6	-	-	0,25	0,25	0,90
Bagasse with CEST - existing	959	959	4.8	4.8	-	-	0,25	0,25	0,90
Bagasse with CEST - new	2712	2392	4.6	4.6	-	-	0,30	0,30	0,90
Bagasse with BIG/GT	1009	1009	4.8	4.8	-	-	0,40	0,40	0,80
Biomass -steam turbine	3600	2500	6.3	6.3	50	50	0,28	0,28	0,60
Municipal solid waste	7050	6210	-	-	211	186	0,28	0,28	0,74
Oil									
Diesel	1000	1000	14.3	14.3	-	-	0,35	0,35	0,35
Fuel oil	1070	1070	14.3	14.3	-	-	0,30	0,33	0,55
Non-conventional RE									
Solar PV-US	4300	1300	-	-	51	15	-	-	0,17
Solar PV-DG	5300	2000	-	-	22	8	-	-	0,17
Wind onshore	1810	1547	-	-	42	36	-	-	0,35
Wind offshore	5000	3000	-	-	60	36	-	-	0,40
Wave	6000	4500	-	-	20	20	-	-	0,15
Solar CSP - 4hTES	5208	3315	-	-	85	54	-	-	0,32
Solar CSP - 8hTES	6312	3912	-	-	103	64	-	-	0,37
Solar CSP - 12hTES	7254	4422	-	-	118	72	-	-	0,42
Solar CSP-BIO	5856	3641	5.0	5.0	65	65	0,57	0,57	0,51

Notes: \*Availability of hydropower plants is highly vulnerable to climate conditions. Variable O&M cost does not include fuel cost. PC: pulverized coal. FBC: fluidized-bed coal. IGCC: integrated gasification combined cycle. CCS: carbon capture and storage. OCGT: open cycle gas turbines. CCGT: combined cycle gas turbines. BIG/GT: biomass integrated gasification/ gas turbines. CEST: condensing-extraction steam turbine, n.a.: not applicable. RE: renewable energy. US: utility scale. DG: distributed generation. CSP: concentrated solar power. TES: thermal energy storage. CSP-BIO: CSP power plant hybridized with biomass, without TES.

Fonte: Koberle *et al.* (2018)

## Setor de O&G e Biocombustíveis no Brasil

A metodologia utilizada no modelo BLUES parte do potencial de recursos de diferentes tipos de petróleo e gás natural, incluindo a estimativa da disponibilidade de recursos a diferentes custos de produção. A metodologia para avaliação da transição para o *upstream* do setor de O&G considera três possíveis etapas distintas do desenvolvimento e da produção de petróleo bruto: recuperação primária, secundária e terciária (ou aprimorada). Durante a recuperação primária, a pressão natural do reservatório é elevada por gravidade e por técnicas de elevação artificial (como bombas), que trazem o óleo para a superfície. Já as técnicas de recuperação secundárias prolongam a vida produtiva de um campo injetando água ou gás para substituir o óleo e levá-lo para um poço de produção. Finalmente, o *Enhanced Oil Recovery* (EOR) é um conjunto de técnicas para aumentar a quantidade de petróleo bruto que pode ser extraído de um campo de petróleo, o que estende sua vida útil, porém com maiores custos de produção (Rochedo, 2016). Diante dessas possibilidades, conforme seus custos e potenciais, os impactos de cenários de descarbonização podem ser percebidos em termos de volume de produção e exportação de óleo bruto no modelo.

O BLUES também possui uma representação detalhada das opções de biocombustíveis, desde opções convencionais (ex: etanol e biodiesel) a opções de biocombustíveis avançados. Esta última categoria inclui opções tecnológicas de produção de energéticos análogos aos combustíveis fósseis convencionais (ex: diesel, querosene, bunker), que podem ser utilizados diretamente (*drop-in*), mas que não contribuem com emissões diretas de CO<sub>2</sub>.

Dentro do contexto de trajetórias de baixo carbono, os biocombustíveis podem configurar uma grande vantagem competitiva do Brasil, especialmente considerando a disponibilidade de terra, os rendimentos agropecuários favoráveis e a experiência nacional no tema. Os biocombustíveis avançados podem representar um investimento estratégico na transição para uma economia de baixo carbono para diversos setores, como o setor industrial, não só como energia, mas também como insumo para produção de petroquímicos. A aplicação mais ampla dos biocombustíveis é no setor de transportes, onde podem promover uma descarbonização com menor necessidade de alteração da infraestrutura existente e menor impacto do perfil de consumo (como no caso de veículos elétricos a bateria).

Além disso, algumas rotas de biocombustíveis avançados e as aplicações de biomassa para produção de petroquímicos podem contribuir para metas mais ambiciosas de descarbonização da economia pelo uso de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS, em inglês). O CCS acoplado a cadeia de conversão de biomassa podem alcançar emissões negativas e representar uma opção mais efetiva para reduzir as emissões de GEE.

Por fim, podem existir correlação entre os investimentos da cadeia de O&G e dos biocombustíveis, seja na cadeia logística, seja em investimentos de unidades de processamento. Assim, existem riscos e oportunidade ora conflitantes, ora complementares nas duas cadeias, que merecem ser avaliados criteriosamente.

**Tabela 4.** Produtos agropecuários modelo BLUES

AGRICULTURA		
Algodão	Cana-de-Açúcar	Floresta Plantada
Arroz	Cereais	Frutas
Café	Feijões	Gramíneas
Floresta Plantada	Milho	Raízes
Frutas	Nozes	Soja
Gramíneas	Oleaginosas	Trigo
Vegetais		
PECUÁRIA		
Gado de Corte	Gado Leiteiro	Galinha Poedeira
Outros - Frangos		

Fonte: Elaboração própria

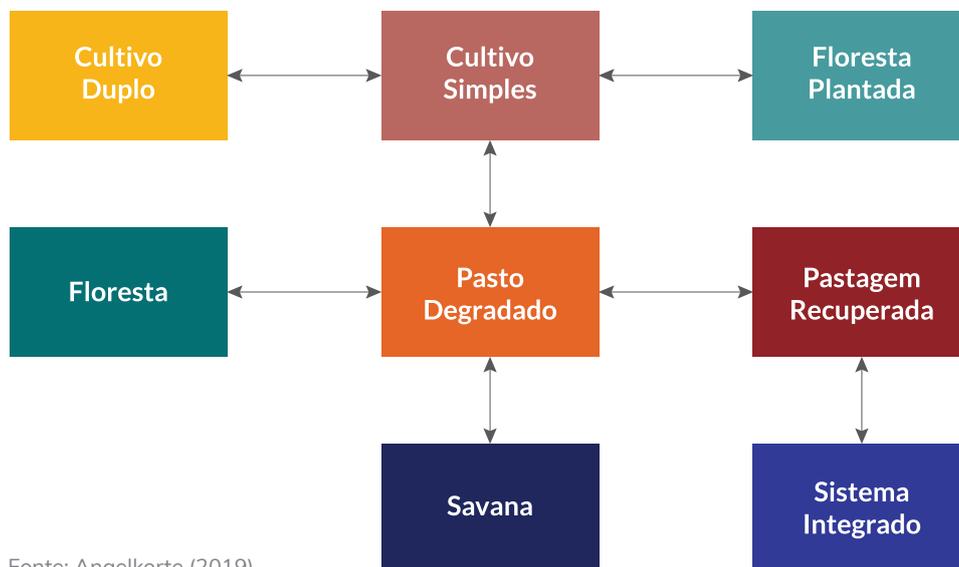
## Setor Agropecuário Brasileiro

O setor agropecuário brasileiro possui grande importância mundial tanto para a produção de alimentos quanto de *commodities* bioenergéticas. O modelo BLUES, devido ao seu nível de detalhamento tecnológico e espacial do Brasil, é capaz de determinar as influências de diferentes cenários de longo prazo no setor agropecuário do país. O BLUES possui a representação de 20 produtos agropecuários (**Tabela 4**), os quais são produzidos para atingir demandas exógenas de alimentos e de *commodities* bioenergéticas informadas pelos modelos TEA-COFFEE. Insumos agropecuários para a produção de biocombustíveis tradicionais e avançados são determinados pelo próprio modelo BLUES de forma a atingir metas da matriz energética brasileira e climáticas mundiais.

O modelo possui três tipos distintos de meios de produção agrícola de cultivo simples (Padrão Histórico, Alta Produtividade e Orgânicos) e um de cultivo duplo (safra e safrinha) que foram desenvolvidos de forma regionalizada e respeitando as condições edafoclimáticas, aptidões de cultivo e especificidades de cada região do país de forma a desenvolver parâmetros técnicos e econômicos de produção agrícola condizentes. Além disso, o setor pecuário de corte possui dois tipos de produção bovina, a extensiva em pasto degradado e a extensiva em pasto recuperado, e sistemas integrados que possuem a participação tanto da parte agrícola quanto pecuária dentro de uma só região.

Esse nível de detalhamento do setor agropecuário é de suma importância para determinar as necessidades das mudanças de uso do solo existentes no modelo (**Figura 21**), como a migração de floresta para pastagens degradadas ou então abertura de novas zonas para o cultivo de culturas bioenergéticas. Cada transição do uso do solo possui emissões, insumos e custos atrelados que tornam possível o modelo atingir a meta de otimização de menor custo e indicar medidas de mitigação que auxiliem no atingimento de metas climáticas de cenários de longo prazo.

**Figura 21.** Transições de uso da terra modeladas no BLUES



Fonte: Angelkorte (2019)

Assim, os riscos e oportunidades serão avaliados a partir da construção de diferentes cenários de longo prazo. Logo, será possível avaliar as possíveis migrações de meios de produção agropecuários à medida que o aumento da demanda por alimentos e bioenergéticos tornem necessário a produção mais eficiente; transições do uso da terra; expansão da produção agropecuária nas regiões brasileiras; mudanças nas demandas agropecuárias em cenários climáticos mais restritivos; e, emissões de cada setor dentro da agropecuária.

## Referências do Anexo B:

- ANGELKORTE, G. B. Modelagem do Setor Agropecuário Dentro de Modelo de Análise Integrada Brasileiro/Gerd Brantes Angelkorte–Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.XIV, 123p.: il.; 29,7 cm.
- CLARKE, L., JIANG, K., AKIMOTO, K., 2014. Assessing Transformation Pathways. In: IPCC Fifth Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. CLARKE,
- GRITEVSKYI, A., NAKICENOVI, N., 2000, “Modeling uncertainty of induced technological change”, Energy Policy, 28, pp. 907-921.
- IAEA, 2007. International Atomic Energy Agency, MESSAGE – User Manual, Vienna, Austria
- KÖBERLE, A. Implementation of Land Use in an Energy System Model to Study the Long-Term Impacts of Bioenergy in Brazil and its Sensitivity to the Choice of Agricultural Greenhouse Gas Emission Factors. 2018. 135 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- KÖBERLE, A. C., GARAFFA, R., CUNHA, B. S., ROCHEDO, P., LUCENA, A. F., SZKLO, A., SCHAEFFER, R., 2018, “Are conventional energy megaprojects competitive? Suboptimal decisions related to cost overruns in Brazil”, Energy policy, v. 122, pp. 689–700.
- LUCENA, A., CLARKE, L., SCHAEFFER, R., SZKLO, A., ROCHEDO, P., NOGUEIRA, L., DAEBZER, K., GURGEL, A., KITOUS, A., KOBER, T., 2015, “Climate policy scenarios in Brazil: A multi-model comparison for energy”, Energy Economics, 56, pp. 564-574. LUCENA,
- MCTI, 2017. Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente. Disponível em: [https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/opcoes\\_mitigacao/Opcoes\\_de\\_Mitigacao\\_de\\_Emissoes\\_de\\_Gases\\_de\\_Efeito\\_Estufa\\_GEE\\_em\\_SetoresChave\\_do\\_Brasil.html](https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/opcoes_mitigacao/Opcoes_de_Mitigacao_de_Emissoes_de_Gases_de_Efeito_Estufa_GEE_em_SetoresChave_do_Brasil.html).
- OROSCO, R. T., 2020. Proposta de introdução do nexa da água com energia e uso do solo dentro de um modelo de avaliação integrada brasileiro (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- RIahi, K., VAN VUUREN, D.P., KRIEGLER, E., EDMONDS, J., O’NEILL, B.C., FUJIMORI, S., et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. Glob Environ Chang 2017; 42:153–68. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- ROCHEDO, P. “Development of a global integrated energy model to evaluate the Brazilian role in climate change mitigation scenarios”, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2016.
- VÁSQUEZ-ARROYO, E. M., 2018. Incorporação Do Nexa Energia-Água Em Um Modelo De Otimização Da Expansão Do Sistema Energético Brasileiro. 2018. 232. Universidade Federal do Rio de Janeiro.